
WIEN
BÄCKERSTRASSE

ALLGEMEINE
ENCYKLOPÄDIE DER PHYSIK.

BEARBEITET

VON

P. W. BRIX, G. DECHER, F. C. O. von FEILITZSCH, F. GRASHOF, F. HARMS,
H. HELMHOLTZ, G. KARSTEN, H. KARSTEN, C. KUHN, J. LAMONT,
J. PFEIFFER, E. E. SCHMID, F. SCHULZ, L. SEIDEL, G. WEYER, W. WUNDT.

HERAUSGEGEBEN

VON

GUSTAV KARSTEN.

IX. BAND.
HANDBUCH DER PHYSIOLOGISCHEN OPTIK.

LEIPZIG,
LEOPOLD VOSS.
1867.

HANDBUCH

DER

PHYSIOLOGISCHEN OPTIK.

BEARBEITET

VON

H. HELMHOLTZ,

PROFESSOR DER PHYSIOLOGIE ZU HEIDELBERG.

MIT 213 IN DEN TEXT EINGEDRUCKTEN HOLZSCHNITTEN UND 11 TAFELN.

LEIPZIG,

LEOPOLD VOSS.

1867.

Vorrede.

Die erste Abtheilung des vorliegenden Handbuches ist schon im Jahre 1856 erschienen, die zweite 1860, die dritte theils Anfang, theils Ende 1866. Die lange Verzögerung der Herausgabe des letzten Theils war theils durch äussere Gründe, zweimaligen Wechsel des Wohnortes und Wirkungskreises, sich zwischendrängende andere wissenschaftliche Arbeiten, theils durch innere Gründe veranlasst. Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen ist gerade im Laufe der letzten Jahre sehr vielfältig bearbeitet worden, und hat eben angefangen ihren reichen Inhalt und das tiefgreifende Interesse, was sie besitzt, zu entfalten. Es könnte billiger Weise auch jetzt noch einem Zweifel unterliegen, ob es schon möglich ist, mit einiger Aussicht auf Erfolg einen, wenn auch nur vorläufigen, Abschluss eines so jungen und gleichsam noch gährenden Zweiges der Wissenschaft geben zu wollen, wie es doch der allgemeine Plan dieses Buches und der Encyklopädie, zu der es gehört, erfordert. Andererseits ist bei der eigenthümlichen Natur dieses Gebiets ein schneller Fortschritt zu einer endgiltigen Beantwortung der noch offenen Fragen nicht gerade zu erwarten. Theils ist dasselbe eng verflochten mit den schwierigsten psychologischen Problemen, theils ist die Zahl der Beobachter gering, die es fördern können, da immer eine lange Uebung in der Beobachtung subjectiver Erscheinungen und in Beherrschung der Augenbewegungen vorhergehen muss, ehe

man auch nur sieht, was die Vorgänger schon gesehen haben, und Mancher, der diese Uebungen nicht vorsichtig genug anstellt, schon dann genöthigt ist, eine sorgfältige Schonung seiner Augen eintreten zu lassen. Dazu kommt, dass gerade hier, wo psychische Processe eingreifen, auch der Spielraum der individuellen Abweichungen viel grösser zu sein scheint, als in anderen Gebieten der Physiologie.

Dennoch musste am Ende der Versuch gemacht werden, Ordnung und Zusammenhang in dieses Gebiet hineinzubringen und es von den auffälligen Widersprüchen zu befreien, die sich bis jetzt durch dasselbe hinzogen. Ich habe dies gethan in der Ueberzeugung, dass Ordnung und Zusammenhang, selbst wenn sie auf ein unhaltbares Princip gegründet sein sollten, besser sind als Widersprüche und Zusammenhanglosigkeit. Ich habe deshalb das Princip der empiristischen Theorie, wie ich es im 26. und 33. Paragraphen auseinandergesetzt habe, und von dem ich mich immer mehr überzeugt habe, je länger ich arbeitete, dass es das einzige ist, welches ohne Widersprüche durch das Labyrinth der gegenwärtig bekannten Thatsachen hindurchführt, zum Leitfaden genommen. Es sind mir auf diesem Wege schon andere Forscher vorangegangen, deren Arbeiten, vielleicht wegen einer der materialistischen Neigung der Zeit entsprechenden Vorliebe zu unmittelbar mechanischen Erklärungen, im Ganzen nicht den Beifall gefunden haben, den sie wohl verdient hätten. Der Grund davon kann darin gelegen haben, dass diese meine Vorgänger immer nur einzelne Kapitel der Lehre von den Gesichtswahrnehmungen bearbeitet haben, und hier eigentlich nur der Zusammenhang des Ganzen der Ansicht, in welcher er gewonnen wird, überzeugende Kraft verschaffen kann. Ich habe mich deshalb bemüht, diesen Zusammenhang vollständig zu entwickeln.

Den Uebelständen, welche durch die Verzögerung der Herausgabe des Ganzen für die ersten beiden Abtheilungen entstanden sind, habe ich dadurch abzuhelfen gesucht, dass ich in einem Nachtrage die neuere Literatur zusammengestellt und kurz wenigstens die wichtigsten der seit Herausgabe jener Abtheilungen neu gefundenen Thatsachen besprochen habe. Glücklicher Weise befindet sich unter diesen keine, welche eine wesentliche Veränderung der aufgestellten Schlüsse und Ansichten bedingt hätte.

Was die literarischen Uebersichten betrifft, die nach dem Plane der Encyklopädie verlangt wurden, so habe ich sie so gut gegeben, als ich bei den mir zu Gebot stehenden Hilfsmitteln konnte. Die neuere Literatur wird ziemlich vollständig sein; die ältere habe ich vielfach aus secundären Quellen zusammentragen müssen und kann für ihre Genauigkeit keine Garantie übernehmen. Die Ausarbeitung einer wirklich zuverlässigen Geschichte der physiologischen Optik würde eine Arbeit sein, die die Zeit und Kraft eines Forschers für lange Jahre in Anspruch nähme, und das entsprechende Interesse würde sie doch erst haben, wenn der Zustand der Wissenschaft selbst ein reiferer wäre, als er jetzt ist.

Mein Hauptstreben bei der Ausarbeitung des vorliegenden Buches ist es gewesen, mich durch eigenen Augenschein und eigene Erfahrung von der Richtigkeit aller, nur einigermassen wichtigen Thatsachen zu überzeugen. Die Methoden der Beobachtung habe ich stets in derjenigen Ausführungsweise beschrieben, welche mir die zuverlässigste zu sein schien, und wo dieselben von der Methode des Entdeckers abweichen, bitte ich darin nicht eine unmotivirte Sucht nach Neuerungen zu sehen.

Mögen sachverständige Richter die Schwierigkeit und Weitläuftigkeit der Aufgabe, die zu lösen war, berücksichtigen, wo sie das ihnen hier übergebene Buch zu tadeln finden sollten.

Heidelberg, im December 1866.

H. Helmholtz.

Verzeichniss einiger Abkürzungen,

welche in den Citaten gebraucht sind.

Der Band des betreffenden Werkes ist jedes Mal mit römischer Ziffer, die Seite mit arabischer bezeichnet; wo eine Zeitschrift mehrere Serien von Bänden umfasst, ist die arabische Nummer der Serie, eingeklammert (....), der römischen Zahl des Bandes vorausgesetzt worden.

---

1. Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königl. Preuss. Akademie der Wissenschaften zu Berlin. — Berl. Monatsber.
2. Abhandlungen der mathematisch-physikalischen Klasse der Königl. Bair. Akademie der Wissenschaften. — Abh. d. Münch. Ak.
3. Abhandlungen der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. — Abh. d. Kön. Ges. zu Göttingen.
4. Göttingische gelehrte Anzeigen unter Aufsicht der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften. — Götting. gel. Anz.
5. Abhandlungen der Leipziger Akademie. Abh. d. Sächs. Ges. d. Wiss.
6. Berichte der Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. — Leipz. Ber.
7. Annalen der Physik und Chemie, herausgegeben von J. C. Poggendorff. — Pogg. Ann.
8. Journal für reine und angewandte Mathematik, herausgegeben von A. L. Crelle. — Crelle's J.
9. Notizen aus dem Gebiete der Natur- und Heilkunde, herausgegeben von Froriep und Schleiden. — Fror. Not.
10. Polytechnisches Journal, herausgegeben von J. G. Dingler und E. M. Dingler. — Dingler's pol. J.
11. *Archives des sciences physiques et naturelles par* de la Rive, Marignac *et* Pictet. — *Arch. d. sc. ph. et nat.* oder *Arch. de* Genève.
12. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. — Phil. Trans.*
13. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. — Edinb. Trans.*
14. *Proceedings of the .... meeting of the British Association. — Rep. of Brit. Assoc.*
15. *The London, Edinburgh and Dublin philosophical Magazine and Journal of science, conducted by* Brewster, Taylor, Phillips, Kane. — *Phil. Mag.*
16. *The Edinburgh new philosophical Journal, cond. by* R. Jameson. — *Edinb. J.*
17. *The American Journal of science and arts, cond. by* Silliman, B. Silliman *and* Dana. — *Sillim. J.*
18. *Mémoires présentés à l'Académie Royale de Bruxelles. — Mém. de Brux.*
19. *Bulletin de l'Académie Royale des sciences et belles lettres de Bruxelles. — Bull. de Brux.*
20. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris. — C. R.*
21. *L'Institut, journal universel des sciences et des sociétés savantes en France et à l'étranger. — Inst.*
22. *Mémoires de l'Académie des Sciences à Paris. — Mém. de Paris.*
23. *Mémoires des savants étrangers, présentés à l'Académie des Sciences à Paris. — Mém. d. Sav. étr.*
24. *Annales de chimie et de physique par MM.* Gay-Lussac, Arago, Chevreul, Dumas, Pelouze, Boussingault *et* Regnault. — *Ann. de ch. et de ph.*

25. *Bulletin de la société d'encouragement pour l'industrie nationale.* — Bull. de la Soc. d'enc.
26. *Bulletin de la classe physico-mathématique de l'Académie impériale des Sciences de St. Pétersbourg.* — Bull. de St. Pét.
27. *Mémoires présentés à l'Académie impériale de St. Pétersbourg.* — Mém. de Pétersb.
28. Archiv für Ophthalmologie, herausgegeben von F. Arlt, F. C. Donders und A. v. Graefe. — Arch. f. Ophthalm.
29. Sitzungsberichte der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. — Wien. Ber.
30. *Cosmos, revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des Sciences, redigée par* Moigno. Paris. — Cosmos.
31. Archiv für die holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde, herausgegeben von F. C. Donders und W. Berlin. — Arch. für d. holl. Beitr.
32. Nederlandsch Archief voor Genees- en Natuurkunde, uitgegeven door F. C. Donders en W. Koster. — Nederl. Arch.
33. .... Jaarlijksch Verslag betrekkelijk de verpleging en het onderwijs in het Nederlandsch Gasthuis voor Ooglijders. — Jaarl. Versl. in het Nederl. Gasth.
34. Henle und Pfeuffer Zeitschrift für rationelle Medicin. — Henle u. Pfeuffer Zeitschr. oder Zeitschr. für rat. Med.
35. Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin, herausgegeben früher von J. Müller, jetzt von C. B. Reichert und E. du Bois-Reymond. — J. Müller's Archiv oder Reichert und du Bois Archiv.
36. Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt a. M. — Jahresber. d. Frankf. Ver.
37. *Athenaeum, journal of litterature, science and the fine arts.* — Athen.

Inhaltsverzeichniss.

ANATOMISCHE BESCHREIBUNG DES AUGES.

PHYSIOLOGISCHE OPTIK.

Erster Abschnitt.

Die Dioptrik des Auges.

Zweiter Abschnitt.

Die Lehre von den Gesichtsempfindungen.

Dritter Abschnitt.

Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen.

Anatomische Beschreibung des Auges.

§. 1. Formen des Sehorgans im Allgemeinen.

Die Augen der Thiere unterscheiden:

Entweder nur Hell und Dunkel. Dies ist wahrscheinlich bei den sogenannten Augenpunkten der niedersten Thierformen (Ringelwürmer, Eingeweidewürmer, Seesterne, Seeigel, Quallen, Infusionsthierchen) der Fall. Ein lichtempfindender Nerv, dessen peripherisches Ende dem Lichte zugänglich unter durchsichtigen Decken liegt, genügt zu diesem Zwecke. Das peripherische Ende des Nerven scheint meistens von verschiedenfarbigem Pigment umgeben zu sein, und verräth sich dadurch dem Beobachter. Doch wissen wir durchaus noch nicht, ob alle pigmentirten sogenannten Augenpunkte der niederen Thierformen wirklich zur Lichtempfindung dienen. Andererseits müssen wir aus der Empfindlichkeit, welche niedere Thiere ohne Augenpunkte für das Licht zeigen, schliessen, dass auch lichtempfindende Nerven in durchsichtigen Thieren ohne Pigment vorkommen, die nur der Beobachter in keiner Weise als solche erkennen kann.

Oder die Augen unterscheiden nicht blos Hell und Dunkel, sondern auch Gestalten. Um das zu können, muss Licht, welches von gesonderten leuchtenden Punkten ausgeht, gesondert, d. h. mittels verschiedener Nervenfasern wahrgenommen werden. Es darf dann nicht mehr jede einzelne Nervenfaser von allen Seiten des Raums her Licht empfangen, sondern nur von einem beschränkten Theile des Raums. Jeder einzelnen Nervenfaser entspricht dann ein gewisses Gesichtsfeld, und es wird in der Wahrnehmung unterschieden werden können, in welchen dieser elementaren Gesichtsfelder leuchtende Körper liegen, in welchen nicht. Je kleiner jedes einzelne Gesichtsfeld ist und je grösser ihre Gesammtzahl, desto kleinere Theile der uns umgebenden Körper können unterschieden werden, bis bei der höchsten Vollendung des Gesichtsorgans die einzelnen elementaren Gesichtsfelder gegen das Gesammtgesichtsfeld verschwindend klein werden. Für ein solches Organ können wir die

Bedingung des deutlichen Sehens so aussprechen: Licht, welches von einem leuchtenden Punkte der Aussenwelt kommt, darf nur auf einen Punkt der lichtempfindenden Nervenmasse (Netzhaut) fallen.

Die Scheidung des Lichts, welches von verschiedenen Seiten des Raums kommt, geschieht

entweder durch trichterförmig gestellte, undurchsichtige Scheidewände (zusammengesetzte Augen der Wirbellosen),

oder durch Brechung des Lichts an gekrümmten brechenden Flächen (einfache Augen der Wirbellosen und Augen der Wirbelthiere).

Die Trennung der Augen, welche nur Licht und Dunkel, und derer, welche auch Gestalten wahrnehmen, ist keine scharfe. Schon bei den niedersten Thierformen bewirken die Pigmentscheiden der lichtempfindenden Nervenfasern, dass Licht nur von der freien Seite auf das Ende der Faser fallen kann, und mit Hülfe von Bewegungen seines Körpers wird ein Thier mit solchen Augenpunkten schon ermitteln können, von welcher Seite das meiste Licht kommt, ebenso wie der Mensch durch sein Hautgefühl die Richtung einstrahlender Wärme wahrnimmt, oder ein Kranker mit vollständig getrübter Krystallinse den Ort der Fenster eines Zimmers ermittelt. In dieser Beziehung haben die Pigmentscheiden der Augenpunkte offenbar einen sehr wesentlichen Nutzen. Wo, wie bei den Blutegeln und Planarien, vor der Nervensubstanz noch ein durchsichtiger kugeliger oder kegelförmiger Körper liegt, können schon verschiedene Theile der Netzhaut von dem aus verschiedenen Richtungen einfallenden Lichte verschieden stark getroffen werden. Von diesen findet ein allmäliger Fortschritt der Ausbildung statt durch die einfachen Augen der Crustaceen, Arachniden und Insekten, welche meist hinter der Hornhaut noch eine Linse und einen Glaskörper unterscheiden lassen, zu denen der Mollusken und namentlich der Cephalopoden, welche letzteren denen der Wirbelthiere schon sehr ähnlich sehen. Da die mikroskopischen Elemente der thierischen Gewebe, namentlich auch die des Nervensystems, in allen Klassen ziemlich gleiche Grösse besitzen, und die Genauigkeit des Sehens wesentlich zusammenhängt mit der Menge einzelner empfindender Elemente, die Zahl dieser aber nahehin proportional sein muss der hinteren Oberfläche des Glaskörpers der einfachen Augen, so ist im Allgemeinen wohl anzunehmen, dass die Genauigkeit des Sehens dieser Augen ihren linearen Dimensionen direct proportional ist.

Zusammengesetzte Augen kommen bei Crustaceen vor, wo sie sich oft noch wie ein Aggregat kegelförmig verlängerter einfacher Augen verhalten. Am meisten entwickelt sind sie bei den Insekten. Ihre äussere Oberfläche ist kugelförmig, und nimmt oft mehr als die Hälfte, selbst zwei Drittel einer Kugelfläche ein. Im Centrum der Kugel liegt eine kolbige Anschwellung des Sehnerven, von welcher aus radial nach allen Seiten Fasern gegen die kegelförmigen und ebenfalls radial gestellten Glaskörper hin auslaufen. Die Basis dieser Glaskörper ist gegen die Hornhaut gewendet, welche in der Regel jedem Kegel entsprechend äusserlich eine ziemlich ebene sechs- oder viereckige Facette darbietet, nach innen aber oft linsenförmige Vorsprünge macht. Die einzelnen durchsichtigen Kegel sind durch trichterförmige Pigmentscheiden, in denen sie stecken, von einander ge-

trennt. Ich gebe hier die Abbildung einer Anzahl solcher Kegel aus dem Auge eines Nachtschmetterlings nach JOH. MÜLLER [1]. Es sind mit *a* die Facetten der Hornhaut bezeichnet, mit *b* die durchsichtigen Kegel, mit *c* die Sehnervenfasern, mit *d* das Pigment zwischen ihnen.

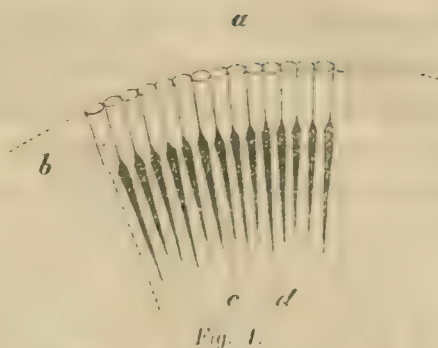


Fig. 1.

Wenn zu jedem Kegel sich nur eine Nervenfaser begiebt, würde das Gesichtsfeld nur in so viel Theile zerfallen, als Kegel da sind. Doch hat GOTTSCHE [2] neuerdings nachgewiesen, dass an den inneren Enden der Kegel ein optisches Bild der vor dem Auge liegenden Gegenstände entworfen wird, so dass auch in jedem Kegel noch eine Sonderung einzelner Eindrücke stattfinden könnte, wenn mehrere empfindende Nervenelemente da wären. Sollte in jedem Kegel nur ein solches vorhanden sein, so würde die Brechung des Lichts doch dadurch noch nützlich sein, dass das der Axe des Kegels parallel einfallende Licht auf das Ende der Nervenfaser concentrirt und das von anderen benachbarten Punkten des Gesichtsfeldes kommende besser davon abgehalten wird, als es die Scheidewände allein thun würden.

Vom Auge des Menschen habe ich in *Fig. 1. Taf. I.* einen horizontalen Querdurchschnitt abgebildet in fünfmaliger Vergrösserung; das Auge der Wirbelthiere ist dem menschlichen im Wesentlichen ähnlich gebaut. Diese Augen schliessen folgende durchsichtige Theile ein:

1) die wässrige Feuchtigkeit in der vorderen Augenkammer *B*.

2) die Krystallinse *A*.

3) den Glaskörper *C*.

Umschlossen sind diese Theile von drei in einander liegenden Systemen von Häuten.

1) System der Netzhaut *i* und *Zonula Zinnii e*, schliesst zunächst den Glaskörper ein und heftet sich vorn an die Linse *A*.

2) System der *Uvea*, besteht aus der durch einen stärkeren schwarzen Strich angedeuteten Aderhaut (*Chorioidea*) *g*, dem Ciliarkörper *h* und der Regenbogenhaut (*Iris*) *b*. Es umschliesst das vorige System mit der Linse und hat nur an der vorderen Seite vor der Linse eine Oeffnung, die Pupille.

3) Die feste Kapsel des Augapfels, welche in ihrem grösseren hinteren Theile aus der undurchsichtigen weissen Sehnenhaut (*Sclerotica*) und in dem kleineren vorderen aus der durchsichtigen knorpeligen Hornhaut (*Cornea*) gebildet wird. Am lebenden Auge sieht man zwischen den Augenliedern den vorderen Theil der Sehnenhaut (das Weisse) und hinter der durchsichtigen und hervorspringenden Hornhaut die braun- oder blaugefärbte ringförmige Iris, in deren Mitte die Pupille.

Eine Linie, welche durch den Mittelpunkt der Hornhaut und durch den Mittelpunkt des ganzen Auges geht, nennt man die Axe des Auges, weil das Auge

---

[1] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig 1826. S. 349. Taf. VII. Fig. 5.
[2] J. MÜLLER's Archiv für Anat. u. Physiol. 1852. S. 483.

wenigstens annähernd einem Rotationskörper mit dieser Axe entspricht. Eine darauf senkrechte Ebene, welche durch die grösste Weite des Augapfels geht, nennt man dagegen die Aequatorialebene.

Ich werde im Folgenden eine Beschreibung der einzelnen Theile des Auges geben, dabei aber natürlich nur so weit in Einzelnheiten gehen, als es für das Verständniss der Functionen des Auges nothwendig ist.

Für die vergleichende Anatomie und Physiologie des Sehorgans sind die Hauptwerke:
J. Müller zur Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig 1826. S. 315.
R. Wagner Lehrbuch der vergleichenden Anatomie. 1835.
J. Müller Handbuch der Physiologie des Menschen. Coblenz 1840. Bd. II. S. 305.
R. Wagner Lehrbuch der speciellen Physiologie. 1843. S. 383.
v. Siebold und Stannius Lehrbuch der vergleichenden Anatomie. Berlin 1848.
Bergmann und Leuckart Anatomisch-physiologische Uebersicht des Thierreichs. Stuttgart 1852.

Als allgemeine Lehrbücher für den Bau des menschlichen Auges:
Th. Sömmerring Abbildungen des menschlichen Auges. Frankfurt a. M. 1801. — Lateinisch ebenda.
C. F. Th. Krause Handbuch der menschlichen Anatomie. Hannover 1842. Bd. I. Th. II. S. 511—551. — Die ältere Literatur der Anatomie des Auges ebenda. S. 733—745.
E. Brücke Anatomische Beschreibung des menschlichen Augapfels. Berlin 1847.
W. Bowman *Lectures on the parts concerned in the operations on the eye and on the structure of the retina and the vitreous humour.* London 1849.
A. Kölliker Mikroskopische Anatomie oder Gewebelehre des Menschen. Leipzig 1854. Bd. II. S. 605. Neuere Literatur ebenda. S. 734—736.

§. 2. Sehnenhaut und Hornhaut.

Die Sehnenhaut des Auges (σκληρόν, *tunica albuginea, sclerotica, dura,* harte Haut) umschliesst den grösseren Theil des Augapfels, bedingt seine Gestalt und schützt ihn vor äusseren Einwirkungen. Ihre äussere Form weicht merklich von der einer Kugel ab; ihre hintere Seite ist nämlich abgeplattet, und im Aequator wird sie oben und unten, rechts und links durch den Druck der geraden Augenmuskeln etwas eingedrückt, während sie sich zwischen diesen Stellen stärker hervorwölbt. Der grösste Durchmesser liegt bei den meisten Individuen von der Nasenseite und oben nach der Schläfenseite und unten. Vorn nimmt die Sehnenhaut die stärker gewölbte Hornhaut in sich auf, hinten und etwas nach der Nase herüber ist sie durchbohrt, um den Sehnerven (*Nervus opticus*) *Fig. 1. d* eintreten zu lassen, und geht hier in dessen sehnigen Ueberzug über. Die Sehnenhaut ist hinten und vorn dicker als in dem Aequator des Auges, wie dies die Figur zeigt. Die vordere Verdickung wird dadurch bedingt, dass die Sehnen der Augenmuskeln sich an die Sehnenhaut anlegen und mit ihr verschmelzen. Bei *m* ist der Ansatzpunkt des inneren, bei *n* der des äusseren geraden Augenmuskels.

Das Gewebe der Sehnenhaut ist Sehnengewebe; es ist weiss, wenig durchscheinend, biegsam, fast unausdehnbar. Seiner chemischen Beschaffenheit nach gehört es zu den leimgebenden Stoffen. Mikroskopisch besteht es aus einem äusserst dichten und straffen Geflechte von Bindegewebsfasern, welche meist der Oberfläche parallel verlaufen, und daher eine unvollkommene Spaltbarkeit der Haut in Lamellen zulassen. Dazwischen liegt, wie in anderen Sehnen, ein Netzwerk äusserst feiner elastischer Fasern, welche an den Stellen, wo sich ursprünglich ihre Bildungszellen befanden, Verdickungen mit Kernrudimenten zeigen.

Die Hornhaut ist vorn in die Sehnenhaut eingesetzt, und hat im Allgemeinen die Form eines starkgekrümmten Uhrglases. Ihre vordere Fläche schliesst sich ziemlich nahe einem Abschnitte eines Rotationsellipsoides an, welches um seine längere Axe gedreht ist. Das Ende dieser Axe liegt in dem Mittelpunkte der Hornhaut. Die Form der hinteren Fläche ist nicht sicher bekannt. Bei Erwachsenen ist die Hornhaut in der Mitte etwas dünner als am Rande.

Die Hornhaut besteht aus folgenden Schichten von aussen nach innen:

1) Ein Epithelium, aus geschichteten platten Zellen von Hornsubstanz gebildet (Pflasterepithelium), in der Figur angedeutet durch die gebrochene Linie *ff*. Es setzt sich auf die Bindehaut der Augenlider fort. Die vordere Fläche dieses Epitheliums wird durch die fortdauernd zufliessende Thränenfeuchtigkeit feucht und glatt erhalten.

2) Die faserige Schicht der Hornhaut (*Substantia propria corneae*) ist die mächtigste von allen, in der Figur weiss gelassen. Sie gehört nach ihrer chemischen Zusammensetzung den Knorpeln an, indem sie beim Kochen Chondrin giebt. Sie besteht aus einem ähnlichen Gewebe von Fasern wie die Sehnenhaut, nur sind die Fasern zu platten Bündeln vereinigt, deren Fläche der Oberfläche der Hornhaut parallel läuft, daher auch die Hornhaut sich unvollkommen in Schichten trennen lässt. Beim Erwachsenen enthält die Hornhaut keine blutführenden Gefässe, wohl aber zwischen den Faserbündeln ein System verästelter kernhaltiger Zellen, wie sie als unentwickeltes elastisches Gewebe in manchen bindegewebigen Organen sich finden, und vielleicht unterhalten diese den zur Ernährung der Hornhaut nöthigen Austausch von Flüssigkeiten durch die Substanz hin. Die Substanz der Hornhaut erscheint bei der gewöhnlichen Beleuchtung vollkommen durchsichtig. Concentrirt man aber viel Licht durch eine Sammellinse auf einen Punkt der Hornhaut, so erscheint sie trüb, indem nun das von den Grenzflächen ihrer mikroskopischen Elemente zurückgeworfene Licht reichlich genug wird, um wahrgenommen zu werden.

3) Die DESCEMET'sche Haut (Wasserhaut, glasartige Lamelle der Hornhaut, auch *Membrana* DEMOURSII) ist eine structurlose, durchsichtige, brüchige Membran von 0,007 Mm. bis 0,015 Mm. Dicke. Wenn man sie von der Hornhaut trennt, rollt sie sich auf. Sie schliesst sich durch ihre Resistenz gegen kochendes Wasser, Säuren und Alkalien dem elastischen Gewebe an. Auf ihrer der wässrigen Feuchtigkeit zugewendeten Fläche trägt sie eine Schicht grosser polygonaler Epithelialzellen, welche durch die punktirte Linie auf der inneren Seite der Hornhaut angedeutet ist.

Die Grenzfläche zwischen Hornhaut und Sehnenhaut ist nicht senkrecht gegen die Oberfläche des Augapfels, sondern aussen greift die Sehnenhaut, innen die Hornhaut weiter über. Auf der inneren Fläche ist die Grenze der Hornhaut ein ziemlich regelmässiger Kreis, von aussen erscheint die Hornhaut dagegen queroval, weil oben und unten die Sehnenhaut etwas mehr übergreift als an den Seiten. Die Fasern der Hornhaut gehen an dieser Grenze unmittelbar in die der Sehnenhaut über.

Eigenthümlich verhält sich dagegen die DESCEMET'sche Haut an der Grenze der Hornhaut. In *Taf. I. Fig. 2* ist ein Querschnitt dieser Gegend dargestellt.

Darin ist *S* die Sehnenhaut, *C* die Hornhaut, *c* ihr äusseres Epithelium, welches auf die Bindehaut *D* übergeht, *d* die DESCEMET'sche Haut. Von *f* ab entspringt zwischen dieser und der Substanz der Hornhaut ein Netzwerk elastischer Fasern, während die DESCEMET'sche Haut selbst mit einem zugeschärften Rande zu enden scheint. Indem sich die Schicht elastischer Fasern von der Sehnenhaut trennt, und weiter hinten sich an eine Lamelle *a* derselben ansetzt, entsteht hier an der Grenze zwischen Sehnenhaut und Hornhaut ein ringförmiger Kanal, der SCHLEMM'sche Kanal. Nach aussen ist derselbe von der Sehnenhaut begrenzt, seine innere Wand besteht dagegen vorn aus elastischem Gewebe, hinten aus Sehnengewebe. An dieser inneren Wand sind die muskulösen Theile der Uvea befestigt. Der genannte Kanal scheint Blut zu führen.

Die Messungen der Dimensionen des Auges sind für die physiologische Optik von der grössten Wichtigkeit, aber meist mit vielen Schwierigkeiten verbunden, weil die Gestalt des ganzen Augapfels und seiner einzelnen Theile einmal bei verschiedenen Augen ausserordentlich verschieden ist, und zweitens nach dem Tode den mannigfachsten Veränderungen unterliegt. Die individuellen Verschiedenheiten sind so gross, dass man Mittelwerthe aus Beobachtungen verschiedener Augen nur mit grosser Vorsicht anwenden darf. Wo es auf genaue und sichere Resultate ankommt, müssen alle wichtigeren Grössen durchaus an demselben Auge gemessen sein.

Was zunächst die äussere Form des Augapfels anlangt, so hängt dieselbe vom Druck der Flüssigkeiten ab, die er einschliesst. Unmittelbar nach dem Tode entleert sich ein grosser Theil seiner Blutgefässe, wobei sich der Druck natürlich verringert; dann vermindert sich allmälig die innere Flüssigkeitsmenge auf endosmotischem Wege noch mehr, so dass der Augapfel schlaff wird, und die Häute, namentlich die Hornhaut, sich falten. Messungen über die Form des Augapfels müssen daher entweder an sehr frischen Augen angestellt werden, oder man muss, wie BRÜCKE [1], den Druck künstlich wiederherstellen, indem man durch den Sehnerven eine Canule einstösst und diese mit einer senkrechten, einer Wassersäule von etwa 0,4 Mt. enthaltenden Röhre in Verbindung bringt. Diese Methode genügt, um die verschiedenen Durchmesser des Augapfels zu messen. Aber für eines der wichtigsten optischen Elemente des Auges, die Hornhautkrümmung, genügt es nicht, den Druck nur annähernd herzustellen. Der Krümmungsradius des Scheitels der Hornhaut wird, wie ich durch eine unten beschriebene Messungsmethode gefunden habe, desto grösser, je grösser der Druck. Der Grund hiervon ist wohl darin zu suchen, dass eine membranöse Hülle, welche Flüssigkeit umschliesst, sich desto mehr der Form einer Kugel nähern muss, je grösser der Druck der Flüssigkeit ist, weil die Kugel unter den Körpern mit gleich grosser Oberfläche das grösste Volumen hat. Wenn dies beim Auge eintritt, wird namentlich die einspringende Rinne zwischen Hornhaut und Sehnenhaut herausgedrängt werden müssen, und dadurch die Hornhaut weniger gewölbt werden.

Unter diesen Umständen ist es offenbar ein wesentliches Bedürfniss, dass so viel als möglich alle wichtigeren Grössenverhältnisse des Augapfels an lebenden Augen bestimmt werden.

Die älteren Messungen des Auges sind meist nur mit dem Cirkel ausgeführt. C. KRAUSE, welcher ein sehr ausgedehntes System von Messungen ausgeführt hat, hat die äusseren Dimensionen des Auges mit dem Cirkel abgemessen, dann hat er die Augen, nachdem er sich die Schnittlinie vorher bezeichnet hatte, halbirt, und zwar Hornhaut, Iris und Linse durch einen Schnitt des Rasirmessers, die Sehnenhaut mit der Scheere, die Hälften dann in ein Schälchen voll Eiweisslösung gelegt, so dass die Schnittfläche sich dicht unter der Oberfläche der Flüssigkeit befand. So mass er die Dimensionen des Querschnitts theils mit dem Cirkel, theils mit einem gegitterten Glasmikrometer im Oculare eines schwach vergrössernden Mikroskops, theils mit einem quadratischen Drahtnetze, welches auf die Oberfläche der Flüssigkeit gelegt wurde. Er hatte vielfach Gelegenheit, sehr frische Augen anzuwenden; bei diesen

[1] Anat. Beschreibung des menschl. Augapfels. S. 4.

können die äusseren Messungen der Sclerotica als hinreichend zuverlässig angesehen werden, die Wölbung der Hornhaut, deren Grösse vom Drucke der Flüssigkeiten abhängt, ist aber wohl an den durchschnittenen Augen beträchtlich verändert gewesen.

Ich gebe hier Krause's Tafel für die Form von 8 Augäpfeln. Es ist Nr. I von einem 30jährigen ertrunkenen Manne, Nr. II das rechte Auge eines 60jährigen Mannes, durch einen Schnitt in den Hals getödtet, Nr. III und IV das linke und rechte Auge eines 40jährigen Mannes, erhängt, Nr. V und VI das linke und rechte Auge eines 29jährigen, Nº. VII und VIII dieselben eines 24jährigen Mannes, die beiden letzten mit dem Schwerte hingerichtet. Die Maasse sind in Pariser Linien angegeben.

Nr.	Axe des Auges		Durchmesser					
			trans-versal.	senkrechter		diagonaler grosser		diagonaler kleiner
	aussere	innere		ausserer	innerer	äusserer	innerer	
I.	10,9	8,85	10,9	10,8	9,9	11,25	10.3	
II.	11,05	10,0		10,3	9,4	11,1	10,2	11,05
III.	10,7	9,8	10,7	10,5	9,6	11	10,2	10,6
IV.	10,5	9,5	10,6	10,3	9,5	10,9	10,1	10,7
V.	10,8	9,55	10,9	10,55	9.6	11,3	10,35	11
VI.	10,8	9,55	11	10,6	9,45	11,3	10,2	11,1
VII.	10,65	9,4	10,75	10,3	9,45	10,75	9,6	10,75
VIII.	10,65	9,45	10,75	10,3	9,15	10,9	9,75	10,7

Brücke hat Messungen an Augen angestellt, welche durch einen Wasserdruck von 1 Decimeter gespannt waren, und giebt an, dass die Axe des Augapfels zwischen 23 und 26 Mm betrage, der grösste horizontale Durchmesser zwischen 22,8 und 26 Mm., der grösste verticale zwischen 21,5 und 25 Mm.

C. Krause vergleicht die innere Wölbung der Sclerotica mit der Fläche eines Rotationsellipsoides; die Axen, welche er berechnet hat, und seine Angaben über Dicke der Hornhaut und Sclerotica an verschiedenen Stellen führe ich hier noch an.

Nr.	Dicke der Sehnenhaut in der Augenaxe.	Dicke der Sehnenhaut am Aequator.	Dicke der Sehnenhaut am vorderen Rande.	Halbe Axen des Ellipsoides der inneren Wölbung. grosse	Halbe Axen des Ellipsoides der inneren Wölbung. kleine	Dicke der Hornhaut. Mitte	Dicke der Hornhaut. Rand
I.	0,55	0,45	0,35	5,12	4,45	0,4	0.5
II.	0,5	0,35		5,05	4,15	0.35	0.5
III.	0,45	0,4	0,35	5,12	4,23	0.4	0.5
IV.	0,5	0.4	0,3	5.07	4,41	0,4	0,45
V.	0,65	0.4	0.3	5,14	4.58	0,5	0,55
VI.	0,65	0,5	0.3	5,05	4,43	0.48	0,55
VII.	0,55	0.5	0.4	5.05	4.41	0.53	0.63
VIII.	0,6	0,5	0.4	4,93	4,19	0,5	0,62

Die Messungen von C. Krause über die Form der Hornhaut übergehe ich hier, weil deren Methode für ein so wichtiges Element nicht zuverlässig genug erscheint. Ich bemerke nur, dass er die vordere Wölbung der Hornhaut für eine Kugelfläche, die hintere für den Scheitel eines Rotationsparaboloides erklärt. Betreffs der Dicke fand ich an einigen Hornhäuten, die ich untersuchte, dass die Dicke in den mittleren zwei Vierteln des Querschnitts fast constant war, und erst gegen den Rand hin schnell zunahm, so dass in der Mitte die Krümmungskreise der beiden Flächen nahe concentrisch zu sein scheinen.

KOHLRAUSCH hat an lebenden Augen den Krümmungsradius der Hornhaut dadurch zu messen gesucht, dass er die Grösse der Spiegelbilder auf der Hornhaut bestimmte. Der, dessen Auge untersucht werden sollte, sass auf einem sehr massiven Stuhle mit hoher Lehne. Sein Kopf wurde durch eine besondere Vorrichtung gehalten, wodurch es ihm leicht wurde, vollkommen ruhig zu sitzen. Er fixirt einen kleinen weissen Punkt, der auf dem Mittelpunkte des Objectivs eines auf 2 bis 3 Fuss Entfernung zu gebrauchenden KEPLER'schen Fernrohrs angebracht ist. Das Fernrohr ist auf das Auge gerichtet, und zwar so, dass der besagte weisse Punkt in derselben Horizontalebene mit dem Mittelpunkte der Hornhaut liegt. In dem Brennpunkte des Oculars sind zwei Spinnfäden parallel gespannt, welche, ohne ihren Parallelismus zu verlieren, durch Schraubenbewegung einander genähert werden können. Auf jeder Seite, wieder in derselben Horizontalebene, steht ein Licht, dessen Schein durch eine runde Oeffnung in einem kleinen Schirme auf das Auge fällt und von diesem reflectirt wird, so dass im Fernrohre zwei kleine Bilder der leuchtenden Punkte erscheinen Nachdem die Spinnfäden auf diese genau gerichtet sind, wird an die Stelle des Auges ein wohlgetheilter Maassstab gebracht, und auf diesem die Entfernung der spiegelnden Stellen der Hornhaut abgelesen. Aus dieser Entfernung, aus dem Abstande des Auges von den Oeffnungen in den Lichtschirmen und dem Mittelpunkte des Objectivs, und endlich aus der Entfernung der letztgenannten Punkte von einander wurde der Radius der Hornhaut annäherungsweise berechnet.

KOHLRAUSCH fand aus Messungen an 12 Augen im Mittel 3,495 Par. Lin. (7,87 Mm.), als kleinsten Werth 3,35, als grössten 3,62, und berechnet den wahrscheinlichen Fehler der einzelnen Bestimmungen auf 0,02.

SENFF hat nach einer ähnlichen, aber nicht genauer beschriebenen Methode nicht blos die Krümmungshalbmesser, sondern auch die Ellipticität der Hornhaut bestimmt und giebt folgende Resultate an:

	Krümmungshalbmesser im Scheitel	Quadrat der Excentricität.	Grosse Axe.	Kleine Axe.	α
Rechtes Auge. Vertical.	7,796	0,1753	9,452	8,583	2°,6
Rechtes Auge. Horizontal.	7,794	0,2531	10,435	9,019	2°,9
Linkes Auge. Vertical.	7,746	0,4492	11,243	8,344	1°,6

Den Winkel α nennt SENFF den Winkel zwischen dem Scheitel der Ellipse und dem Endpunkte der Augenaxe. Jener liegt von diesem in den verticalen Durchschnitten nach unten, in den horizontalen nach aussen. Wahrscheinlich versteht SENFF hier unter Augenaxe dasselbe, was wir später als Gesichtslinie definiren werden.

Die grösste Schwierigkeit bei diesen Messungen ist die, das Auge und den Kopf des Untersuchten gehörig zu befestigen. Bei einer jeden Messungsmethode der Bilder, wobei man erst abzulesen hat, mit welchem Theilstriche der gewählten Scale der eine Rand des Hornhautbildes, und dann, mit welchem der andere zusammentrifft, wird jede kleinste Verschiebung des Kopfes zwischen den beiden Ablesungen zur Grösse des Bildes addirt oder davon subtrahirt werden. Ich habe deshalb ein Messinstrument construirt, welches diese und andere Messungen am Auge genau auszuführen erlaubt, ungestört durch die kleinen Schwankungen des Kopfes, und es eben deshalb Ophthalmometer genannt, obgleich es auch zu einer grossen Menge anderer Messungen, namentlich zu Messungen optischer Bilder mit Vortheil anzuwenden ist. Wenn wir durch eine planparallele Glasplatte, die wir schräg gegen die Gesichtslinie halten, nach einem Gegenstande blicken, sehen wir diesen in seiner natürlichen Grösse, aber um ein wenig seitlich verschoben, und diese Verschiebung ist desto grösser, je kleiner der Winkel zwischen den Lichtstrahlen und den Flächen der Platte wird. Das Ophthalmometer ist im Wesentlichen ein Fernrohr, zum Sehen auf kurze Distanzen eingerichtet, vor dessen Objectivglase neben einander zwei Glasplatten stehen, so dass die eine Hälfte des Objectivglases durch die eine, die andere durch die andere Platte sieht. Stehen beide Platten in einer gegen die Axe des Fernrohrs senkrechten Ebene, so erscheint nur ein Bild des betrachteten Objects,

dreht man aber beide Platten ein wenig und zwar nach entgegengesetzten Seiten, so theilt sich das einfache Bild in zwei Doppelbilder, deren Entfernung desto grösser wird, je grösser der Drehungswinkel der Glasplatten. Diese Entfernung der Doppelbilder aber kann aus den Winkeln, welche die Platten mit der Axe des Fernrohrs machen, berechnet werden. Stellt man die beiden Doppelbilder einer zu messenden Linie so auf einander ein, dass sie sich gerade mit ihren Enden berühren, so ist die Länge der Linie gleich der Entfernung ihrer beiden Doppelbilder von einander und wie diese zu berechnen.

Das Instrument selbst ist auf *Taf. II. Fig. 1* in einer verticalen Ansicht gezeichnet, in *Fig. 2* in einem horizontalen Durchschnitte, in halber natürlicher Grösse. Der viereckige Kasten B_1 B_1 B_2 B_2, welcher die ablenkenden Glasplatten enthält, ist am vorderen Ende des Fernrohrs A befestigt. In *Fig. 1* ist die vordere Wand des Kastens weggenommen, und ausserdem sind alle Theile der unteren Hälfte in der Mittelebene durchschnitten gedacht. Die Grundlage des Kastens bildet ein starker viereckiger Rahmen, den man in *Fig. 1* rings um den Kasten laufen sieht; an diesen sind dünne Messingplatten als Wände befestigt, wie namentlich in *Fig. 2* sichtbar ist. In der Mitte der horizontalen Theile des Rahmens sind konische Durchbohrungen vorhanden, in denen die Drehungsaxen C C der beiden Gläser laufen. Jede der Axen trägt ausserhalb des Kastens eine Scheibe d, deren cylindrischer Umfang in Winkelgrade getheilt ist; bei a ist ein Nonius angebracht, mittelst dessen Zehntheile eines Grades abgelesen werden können. Innerhalb des Kastens trägt jede Axe zunächst ein Zahnrad e e und einen Metallrahmen g, in welchem die Glasplatte f befestigt ist. Der Rahmen jeder Platte hat aber nur drei Seiten, die der anderen Glasplatte zugekehrte Seite desselben fehlt. Die beiden Glasplatten bildeten ursprünglich eine planparallele Platte. Für diese wurde ein vollständiger Metallrahmen gemacht und zwischen den Flächen der beiden Zahnräder befestigt, dann die Axen abgedreht und endlich der Rahmen in der Mitte durchschnitten. Eben so wurde das Glas durchschnitten, jede Hälfte in der entsprechenden Hälfte des Rahmens befestigt. So wurde eine genau übereinstimmende Stellung der Platten auf den beiden Axen erreicht. Bewegt werden die Zahnräder durch die Triebe c_1 und c_2, die an den Axen b_1 c_1 und b_2 c_2 befestigt sind. Jede dieser Axen trägt ausserdem in ihrer Mitte einen Trieb h. Dreht man den Knopf bei b_1, so wird mittels des Triebes c_1 das untere Zahnrad mit der unteren Glasplatte bewegt. Ausserdem greift der Trieb h_1 in den Trieb h_2, und dreht die zweite Axe b_2 c_2 um eben so viel in der entgegengesetzten Richtung. Infolge davon wirkt auch der Trieb c_2 auf das obere Zahnrad, und dreht dieses mit der oberen Glasplatte um einen nahe eben so grossen Winkel wie die untere Platte. Gemessen wird die Drehung jeder Platte mittels der ausserhalb des Kastens auf die Drehungsaxe aufgesetzten getheilten Scheiben.

Es ist nothwendig zwei Platten anzubringen, welche um nahe gleiche Winkel gedreht werden, weil die Bilder der durch die Platten gesehenen Objecte nicht blos seitlich verschoben, sondern auch ein wenig genähert werden, und wenn die Näherung für die beiden Bilder desselben Gegenstandes ungleich gross ist, man das Fernrohr nicht gleichzeitig auf beide genau einstellen kann.

In das vordere Ende des Fernrohrs sind zwei Objectivlinsen einzusetzen, k und l. Die achromatische Doppellinse k allein wird gebraucht, wenn man entferntere Objecte zu betrachten hat. Ihre biconvexe Crownglaslinse wird wie gewöhnlich dem Objecte zugekehrt. Will man dagegen sehr nahe Objecte betrachten, so giebt eine einzelne Linse kein gutes Bild mehr, weil diese Linsen darauf berechnet sind, parallel einfallende Strahlen in einen Punkt zu vereinigen. Deshalb setze ich dann eine zweite achromatische Doppellinse l ein, deren Crownglas der anderen zugekehrt wird. Steht dann das Object im vorderen Brennpunkte dieser zweiten Linse, so macht sie die Strahlen parallel, die erste Linse vereinigt die parallelen Strahlen in ihrem hinteren Brennpunkte. Dadurch erhält man schärfere Bilder. Die Brennweite von k ist bei meinem Instrumente 6 Zoll, die von l 16 Zoll. Das Fernrohr ruht auf einer Säule n, in der ein Cylinder gedreht, sowie auch auf- und abbewegt werden kann. Auf diesem ist mittels des Charniergelenks i das Fernrohr befestigt. So kann man der Fernrohraxe beliebige Stellungen geben. Ausserdem ist noch der Kasten mit den Gläsern drehbar um das vordere Ende des Fernrohrs.

Zunächst will ich nachweisen, wie die Verschiebung der Bilder aus dem Drehungswinkel der Glasplatten zu finden ist.

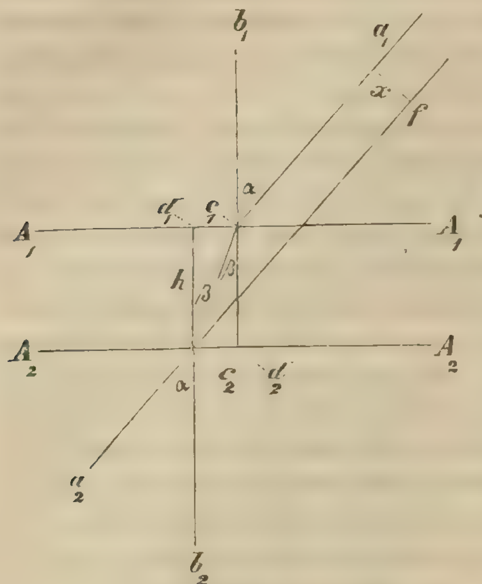


Fig. 2.

Es sei in *Fig. 2* $A_1 A_1 A_2 A_2$ eine der Glasplatten, $a_1 c_1$ der einfallende, $c_1 c_2$ der gebrochene, $c_2 a_2$ der hindurchgegangene Strahl; $b_1 c_1 d_2$ das erste, $b_2 c_2 d_1$ das zweite Einfallsloth. Der Einfallswinkel $b_1 c_1 a_1$, welcher dem Winkel $b_2 c_2 a_2$ gleich ist, werde mit α, der Brechungswinkel $d_2 c_1 c_2$, welcher gleich ist mit $c_1 c_2 d_1$, mit β bezeichnet und die Dicke der Platte mit h. Wird der Strahl $a_2 c_2$ rückwärts verlängert, so scheint der leuchtende Punkt a_1 für ein unterhalb der Platte befindliches Auge in dieser Verlängerung von $a_2 c_2$ zu liegen. Fällt man von a_1 ein Loth $a_1 f$, dessen Länge wir x nennen wollen, auf die genannte Verlängerung, so ist dies x die scheinbare seitliche Verschiebung des leuchtenden Punktes. Es ist

$$x = c_1 c_2 \cdot \sin \angle c_1 c_2 f$$

$$c_1 c_2 = \frac{h}{\cos \beta}$$

$$\angle c_1 c_2 f = \angle d_1 c_2 f - \angle d_1 c_2 c_1$$
$$= \alpha - \beta$$

$$x = h \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta).}{\cos \beta}$$

Der Winkel α wird durch das Instrument gemessen; die Dicke der Glasplatte h muss bekannt sein, ebenso ihr Brechungsverhältniss n gegen Luft. Dann ist

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \beta.$$

Aus dieser Gleichung ist β zu finden, und dann sind alle Stücke zur Berechnung von x bekannt. Benutzt man zwei drehbare Platten, wie in dem Instrumente, welches ich beschrieben habe, geschieht, so ist die Entfernung E zweier beobachteten Punkte, deren Bilder man auf einander gestellt hat, doppelt so gross als x, also

$$E = 2h \frac{\sin(\alpha - \beta.}{\cos \beta}$$

Die Werthe von n und h kann man, wenn andere Bestimmungen derselben fehlen, durch Messungen, die mit dem Instrumente selbst gemacht werden, finden, indem man misst, um welchen Winkel man die Platten drehen muss, um jeden Theilstrich eines genauen Maassstabes auf den nächsten oder den je zweiten, je dritten u. s. w. einzustellen. Man bekommt dadurch eine Reihe zusammengehöriger Werthe von x und α, aus denen man durch ein passendes Eliminationsverfahren h und n bestimmen kann. Will man viele Beobachtungen machen, so ist es rathsam, sich eine Tafel von h für die ganzen Grade von 0^0 bis 60^0 zu berechnen.

Dieselbe Stellung der Doppelbilder, welche bei einer Drehung um α Grade stattfindet, tritt auch ein bei einer Drehung um $-\alpha$, um $180 - \alpha$ und um $\alpha - 180$ Grade. Um Fehler der Theilung und des Parallelismus der Glasplatten zu eliminiren, ist es rathsam, bei diesen vier Stellungen jede Messung zu wiederholen und aus den vier gefundenen Zahlen das Mittel zu nehmen.

Einer der wichtigsten Vortheile des Ophthalmometers ist, dass die lineare Grösse der scheinbaren Entfernung seiner Doppelbilder unabhängig ist von dem Abstande des Objects. Man braucht also den letzteren nicht zu kennen, um die Messungen auszuführen.

Wenn man das beschriebene Instrument zur Messung eines Hornhautbildes anwendet, wird man von kleinen Schwankungen des Kopfes des Beobachteten durchaus nicht gehindert, da beide Doppelbilder immer in derselben Weise sich mitbewegen, und ihre Stellung zu einander nicht geändert wird. Ist gleichzeitig das Object des Hornhautbildes weit genug entfernt, dass die kleinen Schwankungen des Kopfes gegen seine Entfernung verschwinden, so wird auch die Grösse des Bildes nicht merklich durch die Schwankungen verändert, und es genügt daher zur Befestigung des Kopfes, dass man das Kinn leicht aufstützen lässt.

Als Object für das Hornhautbild wählt man entweder ein helles Fenster. Wenn man die parallelen Grenzen zweier Doppelbilder einer solchen hellen Fläche im Ophthalmometer auf einander einstellt, ist das Auge des Beobachters sehr empfindlich für jedes Uebereinandergreifen oder Auseinanderweichen der beiden Bilder, was sich sogleich durch eine weisse oder schwarze Linie zwischen den beiden gleichmässig erhellten Feldern zu erkennen giebt. Oder man benutzt als Object einen fern genug vom Auge aufgestellten Maassstab, und bezeichnet einen seiner Theilpunkte durch eine kleine Lichtflamme, einen andern am besten durch zwei eben solche Flammen, die neben einander stehen. Bei der Messung stellt man das eine Bild der einen Flamme gerade mitten zwischen die der beiden anderen. Es ist diese Art der Einstellung sehr genau auszuführen, wie schon Bessel bei der Messung der Sternparallaxen mit dem Heliometer bemerkt hat.

Die Berechnung des Krümmungsradius der Hornhaut ist sehr einfach, wenn das gemessene Spiegelbild verhältnissmässig klein gegen den Radius ist. Es verhält sich dann die Grösse des Objects zur Entfernung des Objects vom Auge wie die Grösse des Bildchens zum halben Krümmungsradius, und der letztere ist aus dieser Proportion zu berechnen. Auch die Elipticität der Hornhaut kann auf diese Weise bestimmt werden, wenn man das Auge durch passende Verlegung seines Fixationspunktes sich nach einander um verschiedene bekannte Winkel nach den Seiten oder nach oben und unten wenden lässt, und für jede solche Stellung die Grösse des Spiegelbildchens misst. Dann findet man durch Rechnung zunächst die verschiedene Grösse der Krümmungsradien an den verschiedenen spiegelnden Stellen der Hornhaut und aus diesen wieder die Elemente des Ellipsoides, dem sich die Hornhaut nähert.

Ich gebe hier die Elemente des horizontalen Durchschnitts der Hornhaut für drei weibliche Individuen zwischen 25 und 30 Jahren, an deren Augen ich ein System von Messungen durchgeführt habe.

Bezeichnung des Auges.	O. H.	B. P.	J. H.
Krümmundsradius im Scheitel	7,338	7,646	8,154
Quadrat der Excentricität	0,4367	0,2430	0,3037
Halbe grosse Axe	13,027	10,100	11,711
Halbe kleine Axe	9,777	8,788	9,772
Winkel zwischen der grossen Axe und der Gesichtslinie	4_0 19′	6° 43′	7° 35′
Horizontaler Durchmesser des Umfangs	11,64	11,64	12,092
Abstand des Scheitels von der Basis	2,560	2,531	2,511

Der Mittelpunkt der äusseren Fläche der Hornhaut fällt in allen drei Augen fast genau mit dem Scheitel der Ellipse zusammen. Die Gesichtslinie liegt auf der Nasenseite des vorderen Endes der grossen Axe des Hornhautellipsoides.

Messungen des Augapfels sind zu finden bei

1723—30. Petit in *Mém. de l'Acad. des sciences de Paris*. 1723. p. 54. — 1725. p. 18. — 1726. p. 375. — 1728. p. 408. — 1730. p. 4.
1738. Jurin *Essay upon distinct and indistinct vision*. p. 141 in Smith's *complete System of Optics*.
1739. Helsham *a Course of Lectures on Natural Philosophy*. London 1739.
1740. Wintringham *Experimental Inquiry on some parts of the animal structure*. London 1740.
1801. Th. Young *Philos. Transact.* 1801. p. 23.
1818. D. W. Soemmering de oculorum hominis animaliumque sectione horizontali. Göttingen 1818. p. 79*.
1819. Brewster in *Edinburgh Philosoph. Journal*. 1819. No. I. p. 47.
1828. G. R. Treviranus Beiträge zur Anat. und Physiol. der Sinneswerkzeuge. Bremen 1828. Heft I. S. 20*. — Hier sind auch die Resultate der älteren Beobachter zusammengestellt.
1832. C. Krause Bemerkungen über den Bau und die Dimensionen des menschlichen Auges, in Meckel's Archiv für Anatomie und Physiol. Bd. VI. S. 86* (Beschrei-

bung der Methode und Messungen an zwei Augen]. Auszug davon in POGGENDORFF's Ann. T. XXXI. p. 93*.
1836. C. KRAUSE in POGGENDORFF's Ann. T. XXXIX. p. 529* [Messungen an 8 menschlichen Augen].
1839. KOHLRAUSCH über die Messung des Radius der Vorderfläche der Hornhaut am lebenden menschlichen Auge, in OKEN's Isis. Jahrg. 1840. S. 886*.
1846. SENFF in R. WAGNER's Handwörterbuch der Physiol. Bd. III. Abth. 1. Art.: Sehen. S. 271*.
1847. E. BRÜCKE Beschreibung des menschl. Augapfels. S. 4 und 45*.
1854. H. HELMHOLTZ in GRAEFE's Archiv für Ophthalmologie. II. S. 3.

§. 3. Die Uvea.

Das System der Uvea trägt seinen Namen von dem Vergleiche mit einer dunklen Weinbeere, die man von ihrem Stiele getrennt hat. Die Stielöffnung entspricht der Pupille. Sämmtliche Theile dieses Systems zeichnen sich dadurch aus, dass sie auf ihrer inneren Fläche mit einer Lage von Pigmentzellen bedeckt sind, theilweise auch solche in ihrer Substanz vertheilt zeigen, denen sie ihre dunkle Farbe verdanken. Die Uvea ist an zwei Stellen fest mit der Sehnenhaut verbunden, nämlich hinten an der Eintrittsstelle des Sehnerven *Taf. I. Fig. 1. d* und vorn an der inneren Wand des SCHLEMM'schen Kanals *a*. Den Theil *a b b a*, welcher nach vorn und innen von dieser letzteren Befestigung und zunächst hinter der Hornhaut liegt, nennt man *Iris* (Blendung); den hinteren Theil, welcher die innere Fläche der Sehnenhaut bekleidet, Aderhaut (*Chorioidea*).

Im hinteren Theile des Augapfels bildet die Aderhaut eine dünne dunkle Membran, grösstentheils aus Blutgefässen zusammengesetzt, die durch ein eigenthümliches Gewebe verbunden sind. Dieses Gewebe, welches KÖLLIKER als unentwickeltes elastisches Gewebe bezeichnet, besteht aus in einander geflochtenen strahligen, zum Theil mit Pigment gefüllten Zellen, deren Ausläufer äusserst fein verästelt sind. Dies eigenthümliche Stroma verbindet zunächst die Arterien und Venen der Aderhaut, die Schicht der Capillargefässe (*membrana chorio-capillaris*) liegt ihm nach innen lockerer auf, und diese wird nach innen, gegen die Retina hin endlich von den Pigmentzellen bedeckt. Letztere bilden auf den hinteren Theilen der Aderhaut eine einfache, auf dem Ciliartheile dagegen eine mehrfache Lage. Ihr Kern ist meist durch seine Durchsichtigkeit zwischen dem schwarzen Pigment erkennbar. In *Fig. 5* stellt *a* diese Zellen von der Fläche, *b* von der Seite nach KÖLLIKER dar, *c* Pigmentkörner, kleine plattgedrückte, länglich runde Körnchen von 0,0016 Mm. Länge, welche durch Chlor und kaustisches Kali zerstört werden.

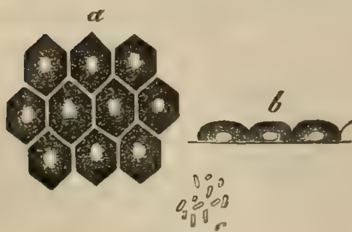


Fig. 5.

Vorn legt sich an die äussere Fläche der Aderhaut ein Muskel, der Ciliarmuskel (*Tensor Chorioideae, Musculus* BRÜCKIANUS), von ihrer inneren Fläche dagegen erheben sich faltenförmige, durch ein Convolut von Gefässstämmen ausgefüllte Hervorragungen, die Ciliarfortsätze (*Processus ciliares*). In *Fig. 1. Taf. I.* ist angenommen, dass der dargestellte Durchschnitt auf der linken Seite durch einen Ciliarfortsatz *c* hindurchgeht, auf der rechten Seite dagegen zwischen zwei

solchen Fortsätzen, daher hier allein der Ciliarmuskel *h* in dem Schnitte sichtbar ist. Die Fasern des Ciliarmuskels entspringen von der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals, da wo sich deren elastischer und sehniger Theil mit einander verbinden, bei *a Taf. I. Fig. 1* und *Fig. 2*, laufen dann an der äusseren Seite der Aderhaut nach hinten, und heften sich an diese Membran. Die Fasern dieses Muskels gehören zu den sogenannten organischen, wie wir sie in den meisten nicht willkürlich bewegten Muskeln antreffen; sie sind mit längsovalen Kernen versehen und nicht quergestreift. Brücke, der den Muskel entdeckte, nimmt an, dass er die Aderhaut (und die mit dieser bei *g* engverbundene Netzhaut und Glashaut) um den Glaskörper anspanne, Donders dagegen, dass die Aderhaut sein fester Ansatzpunkt sei, und er im Gegentheil den elastischen Theil der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals verlängere und so den Ansatz der Iris nach hinten rücke. Vielleicht verbinden sich beide Wirkungen mit einander [1].

Die Ciliarfortsätze sind häutige Falten der Aderhaut, welche in Richtung der Meridianlinien des Auges verlaufen, 70 bis 72 an der Zahl. Sie erheben sich in der Gegend des vorderen Endes der Netzhaut (*Taf. I. Fig. 1. g*), verlaufen allmälig ansteigend nach vorn, wo sie in der Gegend des äusseren Linsenrandes ihre grösste Höhe erreichen, und senken sich dann schnell, indem die vorderen Ausläufer der meisten noch auf die Hinterseite der Iris übergehn. Ihre hervorstehenden scharfen Ränder sind oft von Pigment entblösst, und zeichnen sich als weisse Linien ab, wenn man die Ciliargegend durch den Glaskörper von hinten betrachtet. Die Ciliarfortsätze enthalten eine grosse Menge von Gefässstämmen, durch ein ähnliches Stroma verbunden, wie es in der Aderhaut vorkommt.

Die Iris, der vorderste Theil der Uvea, bildet für das Auge eine bewegliche Blendung. Sie entspringt mit dem Ciliarmuskel gemeinschaftlich an der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals, und zwar an der Grenze des hinteren sehnigen Theils dieser Wand, ist aber (*Taf. I. Fig. 2. b*) durch ein Netzwerk elastischer Fasern, welche frei durch die wässrige Feuchtigkeit verlaufen, mit dem elastischen Theile dieser inneren Wand verbunden. Man nennt diese elastischen Fasern das *Ligamentum Iridis pectinatum*. Von da verläuft die Iris, sich an die vordere Fläche der Linse legend, nach innen bis zu ihrem inneren oder Pupillarrande, und ist dabei leicht nach vorn gewölbt. Sie enthält organische Muskelfasern, welche zu zwei Muskeln zusammengefasst werden können.

1) Der Ringmuskel der Pupille (*Musculus Contractor sive Sphincter Pupillae*) umgiebt in Form eines Ringes von 1 Mm. Breite den Pupillarrand; er liegt vor der Pigmentschicht und hinter der Hauptmasse der zum Pupillarrande verlaufenden Gefässe und Nerven. Seine Fasern verlaufen in concentrischen Ringen, und verengern deshalb bei ihrer Zusammenziehung die Pupille.

2) Der Erweiterer der Pupille (*Musculus Dilatator Pupillae*). Seine Fasern entspringen von der inneren Wand des Schlemm'schen Kanals und wohl auch von den Fasern des *Ligamentum pectinatum*, und verlaufen an der hinteren Seite

---

[1] S. unten §. 12.

der Iris netzförmig mit einander verbunden nach innen, wo sie sich in den Ringmuskel verlieren.

Das Stroma der Iris ist Bindegewebe; hinten ist sie von der Pigmentzellenschicht, vorn von einem Epithelium bedeckt. Auch ihr Stroma enthält oft Pigmentzellen; dann ist ihre Farbe braun, sonst erscheint sie als ein trübes Medium vor dem dunklen Pigmente blau.

Das Verhalten der Gefässe der Uvea bietet vieles Eigenthümliche. Ich habe schon angeführt, dass die Gefässe den grössten Theil der Masse dieses Systems ausmachen. Ihre zuführenden Arterien (*Arteriae ciliares posticae breves* für die Aderhaut und Ciliarfortsätze, *posticae longae* und *anticae* für die Iris) treten durch die Sclerotica ein, und communiciren mit den Venen nicht blos, wie es in anderen Theilen des Körpers der Fall ist, durch ein feines Capillargefässnetz, sondern auch durch ziemlich weite Verbindungsröhren, welche auf der Aderhaut in zierlich geordneten Bögen wedelförmig aus den Arterien entstehen, und sich wieder zu Venen (*Venae vorticosae*) sammeln. Die *Arteriae ciliares posticae breves*, etwa 20 Aestchen, durchbohren die Sclerotica an ihrem hinteren Theile, laufen, sich fortwährend gabelförmig spaltend, nach vorn, und geben ihr Blut theils durch das Capillargefässnetz, welches, so weit die Netzhaut reicht, an der inneren Seite der Aderhaut unter den Pigmentzellen liegt, theils durch die weiten Verbindungsäste der Vortices an die Venen ab, welche theils (*Vasa vorticosa*) am Aequator des Augapfels, theils (*Venae ciliares posticae*) am hinteren Theile durch die Sclerotica austreten. Ein grosser Theil der Aeste dieser Arterien läuft aber nach vorn in die Ciliarfortsätze und bildet in diesen ein Gefässknäuel, dessen rückkehrende Aeste in die vorderen Bögen der Vortices übergehen. Das Gefässnetz der Iris hängt theils mit dem der Ciliarfortsätze zusammen, zum grössten Theile empfängt es aber sein Blut aus besonderen Stämmen, die theils hinten durch die Sclerotica treten (*Art. ciliares posticae longae*) und zwischen Aderhaut und Sehnenhaut nach vorn bis zum Ciliarmuskel verlaufen, theils auch vorn eintreten (*Art. ciliares anticae*). Sie bilden in der Iris zwei anastomosirende Gefässkränze, den einen (*Circulus arteriosus Iridis major*) am peripherischen Rande, den anderen (*Circ. arter. minor*) nahe dem Pupillarrande. An der Stelle des letzteren ist die Iris am dicksten, und bildet auf ihrer vorderen Fläche einen Vorsprung.

Am unverletzten Auge sieht man die Iris durch die Hornhaut. Durch die Wirkung der Strahlenbrechung erscheint sie der Hornhaut näher, also mehr nach vorn gewölbt, als sie es in Wirklichkeit ist. Wenn man dagegen das Auge einer Leiche unter Wasser bringt, dessen Brechungsvermögen dem der wässrigen Feuchtigkeit ziemlich gleich ist, so fällt die Strahlenbrechung an der Hornhaut fast ganz weg, und man sieht die Iris in ihrer natürlichen Lage, wo sie schwach oder nur wenig gewölbt erscheint. Um am lebenden Auge eine richtige Anschauung von der Iris zu erhalten, hat J. Czermak[1] ein Instrument angegeben unter dem Namen **Orthoskop**, welches im Wesentlichen eine kleine Wanne mit Glaswänden ist, die an das Gesicht so angesetzt wird, dass das Auge die Hinterwand derselben bildet, und dann voll Wasser gegossen wird. Das in *Fig. 4* abgebildete Instrument hat eine untere Wand *f c b* und eine innere (der Nase zugekehrte) *g a b* aus Metallblech gebildet. Beide sind am freien Rande passend ausgeschnitten, um sie an das Gesicht ansetzen zu können. Die vordere Wand *a b c d* und die äussere *c d e f* sind aus ebenen Glasplatten gebildet. Um den Rand des Instruments wasserdicht an das Gesicht ansetzen zu können, empfiehlt Czermak geknetete Brodkrume an das Gesicht anzulegen und den Rand des Instruments hineinzudrücken. Das Auge

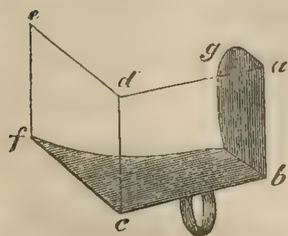


Fig. 4.

[1] Prager Vierteljahrsschrift für prakt. Heilkunde. 1851. Bd. XXXII. S. 154.

wird nun zunächst geschlossen, Wasser von 23 bis 26° R. in das Kästchen gegossen, und dann das Auge geöffnet. Die Hornhaut tritt von der Seite gesehen als eine durchsichtige gewölbte Blase hervor, die Iris tritt als ein fast ebener Vorhang von ihr zurück.

Es könnten bei dieser Methode Zweifel übrig bleiben, ob das Bild der Iris durch die Brechung zwischen Hornhaut und Wasser einerseits, Hornhaut und wässriger Feuchtigkeit andererseits nicht noch ein wenig verändert sei, und da die Frage nach der Form und Lage der Iris für die Lehre von der Accommodation des Auges von grosser Wichtigkeit ist, so will ich hier noch andere Untersuchungsmethoden beschreiben. Eine leicht auszuführende Art, um an lebenden Augen das Relief der Iris kennen zu lernen, ist die folgende. Man stelle seitlich und etwas nach vorn von dem beobachteten Auge ein Licht auf, und concentrire durch eine Sammellinse von etwa 2 Zoll Brennweite und möglichst grosser Oeffnung dessen Strahlen auf einen Punkt der Hornhaut, so dass auf dieser ein Bild des Lichts entworfen wird. Die Hornhaut sieht an der starkbeleuchteten Seite trübe aus. Der Brennpunkt auf der Hornhaut bildet nun gleichsam eine neue Lichtquelle, deren Strahlen, ohne weiter gebrochen zu werden, geradlinig auf die Iris fallen, und, wenn sie schief auffallen, Schlagschatten verschiedener Länge auf ihr entwerfen, aus denen man leicht beurtheilen kann, wie viel ihre einzelnen Theile hervorspringen oder zurückweichen. Bei der angegebenen Untersuchungsmethode findet man die Iris kurzsichtiger Augen oft so platt, dass gar kein Schlagschatten auf ihr entsteht. Bei normalen Augen dagegen sieht man nahe um die Pupille herum den dem *Circulus arteriosus minor* entsprechenden Wulst, der deutliche Schlagschatten wirft. Wenn der lichtgebende Brennpunkt etwa 1 Mm. vom Rande der Hornhaut absteht, verlängert sich dieser Schlagschatten meist bis zum peripherischen Rande der Iris.

Um sich an lebenden Augen von dem sehr wichtigen Umstande zu überzeugen, dass die Iris der Linse dicht anliegt, kann man dasselbe Verfahren gebrauchen, mit dem Unterschiede, dass man den Brennpunkt der Sammellinse ein wenig von der Seite her auf die vordere Linsenfläche fallen lässt. Bei so starker Beleuchtung erscheint dann die Substanz der Linse weisslich trübe, und man sieht, dass von der Iris kein Schlagschatten geworfen wird. Noch besser geschieht dies mittels der Reflexe, welche die vordere Fläche der Linse von einfallendem Lichte giebt. Wenn in *Fig. 5* C_1 C_2 ein convexer Kugelspiegel ist, *D E* ein davorstehender dunkler Schirm mit einer Oeffnung *F G*, das Auge des Beobachters sich in *A* befindet und ein Licht in *B*, und der am Rande der Oeffnung bei *F* vorbeigehende Lichtstrahl *B F* in *H* nach *H A* zurückgeworfen wird, so wird das Auge von den zwischen *H* und C_1 gelegenen Punkten der Spiegelfläche kein zurückgeworfenes Licht erhalten können, diese werden vielmehr die dunkle Hinterseite des Schirms spiegeln müssen. So wird in der Richtung *A J* Licht gespiegelt werden, welches von dem Punkte *K* des Schirms ausgegangen ist. Zwischen *F* und *H* wird also das Auge einen dunklen Theil der Spiegeloberfläche so oft erblicken müssen, als nicht der Rand des Schirms der spiegelnden Fläche ganz dicht anliegt. Man kann sich von der Richtigkeit des Gesagten an jeder spiegelnden convexen Fläche, z. B. eines gewölbten metallenen Knopfes, überzeugen, für welche man sich ein passendes dunkles Diaphragma mit runder Oeffnung gemacht hat. Nur wenn der Rand der Oeffnung dicht an der Fläche liegt, reichen die Spiegelbilder, welche sie von äusseren Gegenständen entwirft, bis an den Rand des Diaphragma. Ist dagegen zwischen letzteren und der spiegelnden Fläche ein kleiner Zwischenraum, so sieht man an dem dem

Fig. 5.

Auge gegenüberliegenden Rande der Oeffnung eine dunkle Linie sich zwischen die Spiegelbilder und den Rand der Oeffnung einschieben.

Die Flächen der Linse reflectiren ebenfalls Licht, aber sehr wenig. Man sieht diese Reflexe [1], wenn sich das Auge in einem dunklen Zimmer befindet, in welchem nur ein Licht enthalten ist. Man stellt das Licht vor dem Auge, etwas seitlich von der nach vorn verlängerten Augenaxe, auf. Der Beobachter sieht von der anderen Seite her in das Auge, so dass seine Gesichtslinie etwa denselben Winkel mit der Augenaxe macht, wie das einfallende Licht. Neben dem bekannten hellen Reflexe der Hornhaut sieht er dann zwei andere sehr viel schwächere. Der grössere von beiden bildet ein aufrechtes, ziemlich verwaschenes Bild der Flamme und rührt von der vorderen Linsenfläche her, der kleinere bildet ein schärferes umgekehrtes Bildchen und wird von der hinteren Linsenfläche entworfen. Von den Augenärzten werden diese Reflexe die SANSON'schen Bildchen genannt. Wenn man die Stellung des Lichts oder des eigenen Auges verändert, während man sie beobachtet, verändert sich auch die Stellung der Bildchen, und so gelingt es leicht, das erstgenannte derselben, das der vorderen Linsenfläche, bis an jede beliebige Stelle des Randes der Pupille zu führen. Man sieht es dann stets, auch an dem dem Beobachter gegenüberliegenden Rande der Pupille, bis dicht an die Iris rücken, ohne zwischenliegende schwarze Linie. Wenigstens ist dies unter normalen Umständen ohne künstliche Erweiterung der Pupille, so viel ich gefunden habe, stets der Fall, und daraus folgt mit Bestimmtheit, dass der Pupillarrand der Iris der Linse anliege.

Die Entfernung der Pupillenfläche von dem Scheitel der Hornhaut ist von C. KRAUSE an durchschnittenen Augen gemessen worden. Indessen ist die Verbindung der Linse mit der Sclerotica durch die Ciliarfortsätze keine so straffe, dass nicht nach der Durchschneidung beträchtliche Verschiebungen eintreten sollten.

Davon, dass die Pupillarfläche hinter einer durch den äusseren Rand der Hornhaut gelegten Ebene liegt, kann man sich am lebenden Auge überzeugen, wenn man es so von der Seite ansieht, dass die Pupille hinter dem Rande der Sclerotica zu verschwinden beginnt. Man sieht alsdann, wie in *Fig. 6*, perspectivisch vor der Pupille einen helleren Streifen, ein verzogenes Bild der Iris, und vor diesem am Rande der Hornhaut einen dunkleren Streifen, den jenseitigen über die Hornhaut greifenden Rand der Sehnenhaut. Bewegt der Beobachter sein Auge noch weiter zurück, so verschwindet ihm die Pupille und Iris ganz, und hinter dem noch sichtbaren Theile der Hornhaut erscheint nur noch der jenseitige Scleroticalrand. Da die Lichtstrahlen, welche einmal durch die Hornhaut in die wässrige Feuchtigkeit eingetreten sind, geradlinig durch diese fortgehen, so folgt daraus, dass die Iris weiter zurück liegt als eine die äusseren Ränder der Hornhaut verbindende Linie.


Fig. 6.

Kennt man den Krümmungsradius im Scheitel der Hornhaut, so kann man die Distanz der Pupillenfläche vom Scheitel der Hornhaut am lebenden Auge ziemlich genau bestimmen, indem man die scheinbare Lage der Iris im Verhältniss zur scheinbaren Lage eines von der Hornhaut gespiegelten Lichtpunktes bestimmt. Das Spiegelbild eines entfernten Lichtpunktes liegt ein wenig hinter der Fläche der Pupille, wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man von verschiedenen Seiten das Auge ansieht, und die perspectivische Lage des Lichtpunktes zu den Rändern der Pupille sich merkt.

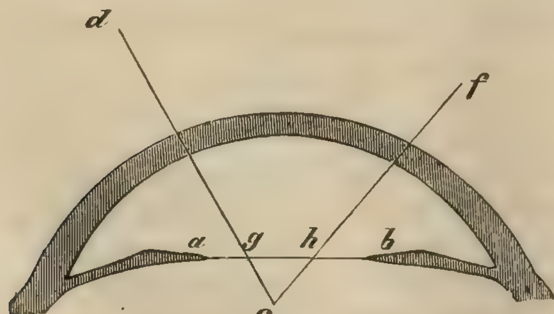


Fig. 7.

Ist *a b* die Pupille, *c* der scheinbare Ort des gespiegelten Lichtpunktes, sind *d c* und *f c*

[1] Entdeckt von PURKINJE. S. dessen Abhandlung: De examine physiologico organi visus et syst. cutanei. Vratisl. 1823. Zur Diagnose von Krankheiten benutzt von SANSON (*Leçons sur les maladies des yeux*. Paris. 1837). Ihr Ursprung ist genauer bestimmt durch H. MEYER (HENLE's und PFEUFER's Zeitschrift 1846. Bd. V.)

zwei verschiedene Richtungen, aus denen der Beobachter nach dem Punkte *c* hinblickt, so wird dieser Punkt von *d* aus gesehen hinter dem Punkte *g* der Pupillarebene, also scheinbar näher an *a*, von *f* aus hinter dem Punkte *h* scheinbar näher an *b* liegen; wie es auch in Wirklichkeit der Fall ist. Man würde nun die Lage des Punktes *c* am einfachsten genau bestimmen können, wenn man seine scheinbare perspectivische Entfernung von den beiden Rändern der Pupille misst, was mit dem Ophthalmometer ausführbar wäre. Aber hierbei sind die fast fortdauernden Schwankungen der Weite der Pupille hinderlich.

Ich fand es deshalb vortheilhafter, etwas anders zu verfahren. Es seien an dem betreffenden Auge die elliptischen Axen der Hornhaut gemessen worden, und die Lage der Gesichtslinie zu ihnen bekannt. Steht dann vor dem Auge ein Licht, dessen Stellung in Bezug auf die Gesichtslinie ebenfalls bekannt ist, so lässt sich aus den bekannten Gesetzen der kugeligen spiegelnden Flächen leicht der scheinbare Ort des von der Hornhaut entworfenen Spiegelbildes berechnen. Wir nehmen also im Folgenden die Lage dieses Spiegelbildes immer als bekannt an. Sucht man nun eine solche Stellung des Lichts, des Fixationspunktes und des Ophthalmometers, dass man von den durch letzteres erblickten Doppelbildern des Lichtpunktes auf der Hornhaut gleichzeitig das eine mit dem einen Rande der Pupille, das andere mit dem andern zum Decken bringen kann, so folgt daraus, dass von dem Orte des Ophthalmometers aus gesehen der gespiegelte Lichtpunkt perspectivisch hinter dem Mittelpunkte der Pupille liegt. Es seien in *Fig. 8* die beiden Linien *e d* und $\varepsilon\,\delta$ parallel der Fernrohraxe des Ophthalmometers, *a b* und $\alpha\,\beta$ die beiden Doppelbilder des horizontalen Durchschnitts der Pupille. Wir nehmen an, dass der Mittelpunkt der Pupille, das Licht, die Axe des Fernrohrs, die Gesichtslinie des beobachteten Auges, alle in derselben Horizontalebene liegen. Nach der oben in §. 2 gegebenen Theorie dieses Instruments müssen alle Verbindungslinien entsprechender Punkte der beiden Doppelbilder gleich lang und senkrecht gegen die Axe des Fernrohrs, die beiden Doppelbilder selbst aber congruent sein. Danach ist also $a\,\alpha$ gleich und parallel $b\,\beta$, und *a b* gleich und parallel $\alpha\,\beta$. Es seien nun *d* und δ die entsprechenden Doppelbilder des Lichtpunktes, und es sei eine solche Stellung des Auges gefunden, bei der *d* von α gedeckt wird und δ von γ, d. h. wo die der Fernrohraxe parallele Linie *d e* durch α und $\delta\,\varepsilon$ durch *b* geht. Aus der Theorie der Parallellinien ergiebt sich nun:

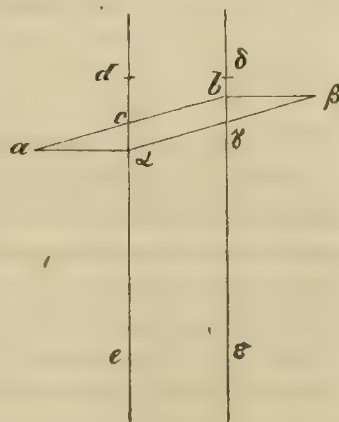


Fig. 8.

$$d\,\delta : b\,\beta = \alpha\,\gamma : \gamma\,\beta$$
$$d\,\delta : a\,\alpha = c\,b : a\,c$$

Da nun aber die Entfernungen entsprechender Punkte der Doppelbilder gleich sind, ist

$$d\,\delta = a\,\alpha = b\,\beta.$$

folglich auch

$$\alpha\,\gamma = \gamma\,\beta \text{ und}$$
$$c\,b = a\,c$$

Die Punkte *c* und γ, hinter welchen die Lichtpunkte *d* und δ perspectivisch erscheinen, sind also die Mittelpunkte der Pupillen.

Es ist nun leicht, durch passende Abmessungen zu ermitteln, welchen Winkel die Linie *e d* oder die Axe des Fernrohrs mit der Gesichtslinie des beobachteten Auges macht. Dann ist die Lage der Linie *e d* im Horizontalschnitt des Auges gegeben durch einen Punkt und den Winkel, den sie mit einer anderen Linie von bekannter Richtung, der Gesichtslinie, bildet. In dieser Linie *e d* liegt auch der Mittelpunkt der Pupille.

Nun braucht man nur noch eine zweite Beobachtung derselben Art zu machen, wobei man von einer anderen Richtung her in das beobachtete Auge sieht. Man bekommt dann eine zweite gerade Linie von bekannter Lage, in welcher der Mittelpunkt der Pupille liegt. Dieser muss also dort liegen, wo die beiden betreffenden Linien sich schneiden, und seine Entfernung von der Hornhaut kann dann durch Construction oder Rechnung leicht gefunden werden.

Die Beobachtungsmethode war nun folgende: A (*Fig. 9*) ist das Auge, an welchem die Messung vorgenommen werden soll; es sieht durch die Oeffnung eines Schirms, um seine Lage annähernd festzustellen. In einiger Entfernung von ihm befindet sich eine horizontale Scale CD. Denkt man sich vom Auge A ein Loth auf die Scale gefällt, so befindet sich an dessen Fusspunkte B ein Schirm mit einer kleinen Oeffnung, hinter der eine Lampenflamme steht, deren Licht durch die Oeffnung auf das Auge fällt, und von der Hornhaut gespiegelt wird. Bei F befindet sich ein verschiebbares Zeichen, welches als Gesichtspunkt dient. Bei G_1 und G_2 sind die Stellungen angedeutet, die man dem Ophthalmometer nach einander giebt, beide gleichweit von B entfernt. Für die drei Füsse des Fernrohrs macht man Marken auf dem Tische, da die Stellung des Fernrohrs während des Versuchs gewechselt wird. Das Auge A wird nun angewiesen, fortdauernd nach dem Zeichen F hinzusehen und allen Bewegungen desselben zu folgen. Der Beobachter, welcher zuerst von G_1 aus beobachten möge, dreht die Glasplatten des Ophthalmometers so weit, bis von den Doppelbildern des hellen Pünktchens auf der Hornhaut das eine mit dem einen Pupillarrande zusammentrifft. Trifft dann das andere nicht gleichzeitig auf den anderen Rand, so verschiebt er das Zeichen F so lange an der Scale, bis dies der Fall ist, und merkt den Theilstrich der Scale, wo F steht. Dasselbe Verfahren wird wiederholt bei der zweiten Stellung des Ophthalmometers in G_2.

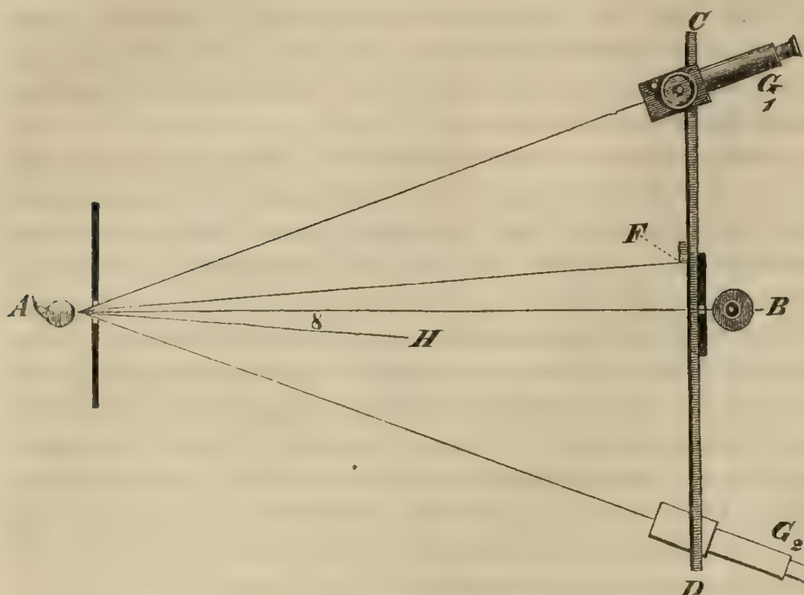


Fig. 9.

Die Länge AB ist in Scalentheilen zu messen; daraus ist der Winkel FAB zu finden.

$$\frac{FB}{AB} = tang. \angle FAB.$$

Ist AH die grosse Axe des Hornhautellipsoides und der Winkel FAH schon bekannt, so ergiebt sich daraus BAH, welchen Winkel man braucht, um die Lage des Spiegelbildes der Hornhaut zu bestimmen. Eben so bestimmt man den Winkel G_1AH, welcher die Richtung bestimmt, in welcher der Beobachter in das Auge gesehen hat. Der Mittelpunkt der scheinbaren Pupille (d. h. wie diese durch die Hornhaut erscheint) liegt dann also in einer mit G_1A parallelen Linie, welche durch den scheinbaren Ort des Hornhautbildchens gelegt ist.

Wie aus der scheinbaren Lage des Mittelpunktes der Pupille seine wirkliche Lage berechnet werden kann, wird sich in §. 9 und 10 ergeben [1].

Die Resultate für die drei Augen, für deren Hornhäute ich die Abmessungen mit dem Ophthalmometer bestimmt habe, waren folgende:

		O. H.	B. P.	J. H.
Abstand der Pupillarebene vom Scheitel der Hornhaut	scheinbar	3,485	3,042	3,151
	wirklich	4,024	3,597	3,739
Abstand des Mittelpunktes der Pupille von der Hornhautaxe nach der Nasenseite	scheinbar	0,037	0,389	0,355
	wirklich	0,032	0,333	0,304

[1] Helmholtz in Graefe's Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abth. 2. S. 31.

Dass die Iris der Linse anliege und nach vorn gewölbt sei, ist von den Anatomen vielfach bestritten worden. Die älteren Anatomen nahmen es an, bis namentlich Petit, auf Grund seiner Untersuchungen an gefrorenen Augen, das Gegentheil behauptete und zwischen Iris und Linse die sogenannte hintere Augenkammer annahm. In gefrorenen Augen findet man bald dünne Eisblätter zwischen Iris und Linse, bald nicht. Der Meinung von Petit folgten fast alle späteren Anatomen, bis in der neuesten Zeit Stellwag von Carion und Cramer sich wieder für die enge Anlagerung der Iris an die Linse erklärten. Ich selbst fand es möglich, in der obenbeschriebenen Weise directe Beobachtungen dafür zu liefern, welche mir keinen Zweifel übrig zu lassen scheinen. Neuerdings vertheidigt dagegen Budge wieder die Ansicht von Petit.

1728. Petit in *Mém. de l'Acad. Roy. des Sciences.* 1728. p. 206 u. 289.
1850. Stellwag von Carion in Zeitschrift d. Wiener Aerzte. 1850. Heft 3. S. 125.
1852. Cramer in Tijdschrift der Nederl. Maatschappij tot bevord. der Geneeskunst 1852. Jan.
1853. Derselbe. Het Accommodatievermogen der Oogen. Haarlem. bl. 64*.
1855. J. Budge über die Bewegung der Iris. Braunschweig. S. 5—10 (giebt auch die ältere Literatur der Streitfrage).
Helmholtz in v. Graefe's Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abth. 2. S. 30.

§. 4. Die Netzhaut.

Die Netzhaut (*Retina*) ist eine flächenförmige Ausbreitung von Nervenmasse, im Hintergrunde des Auges zwischen Aderhaut und Glaskörper gelegen. Sie ist frisch ziemlich durchsichtig, an todten Augen weisslich trübe. Im Hintergrunde des Auges ist sie am dicksten (0,22 Mm.); man bemerkt hier etwas nach der Nasenseite zu die weisse Eintrittsstelle des Sehnerven (*d* in *Taf. I. Fig. 1*) und etwas nach der Schläfenseite hinüber (bei *p*) einen gelben Fleck (*Macula lutea Retinae*), die Stelle des deutlichsten Sehens. Nach vorn zu wird die Netzhaut dünner (am vorderen Rande 0,09 Mm.) und endet da, wo die Ciliarfortsätze beginnen, mit einem gezackten Rande (*Ora serrata Retinae*), wenigstens hören hier ihre nervösen Elemente auf. Sie ist an dieser Stelle eng verbunden mit der Aderhaut und Glashaut (der Hülle des Glaskörpers), und die membranösen Gebilde, welche hier ihre anatomische Fortsetzung bilden (*Pars ciliaris Retinae* und *Zonula Zinnii*), haben eine ganz andere Structur und physiologische Bedeutung.

Die Netzhaut besteht theils aus den gewöhnlichen mikroskopischen Bestandtheilen des Nervensystems, Nervenfasern, Ganglienkörpern, Kernen, theils aus eigenthümlichen, den Stäbchen (*Bacilli*) und Zapfen (*Coni*). *Taf. I. Fig. 5* stellt einen Durchschnitt der Schichten der Retina vom Aequator des Auges nach Kölliker dar; *Fig. 4* einzelne Elemente in ihrem Zusammenhange. Die Schichten sind folgende in der Reihenfolge von aussen nach innen:

1) Stäbchenschicht (*Fig. 5,* 1), gebildet aus den Stäbchen *a* und Zapfen *b*. Die ersteren sind Cylinder, 0,063 bis 0,081 Mm. lang und 0,0018 Mm. dick, von einer stark lichtbrechenden Substanz gebildet. Sie stehen palissadenförmig neben einander gedrängt, sind am äusseren Ende quer abgestutzt, am inneren laufen sie in einen feinen Faden aus, der in die nächste Schicht eintritt. Zwischen ihnen stehen die Zapfen (*Fig. 4 b*); diese sind dicker (0,0045 bis 0,0065 Mm.) und kürzer als die Stäbchen, aus ähnlicher Substanz gebildet; ihr äusseres Ende läuft in ein gewöhnliches Stäbchen aus (Zapfenstäbchen), am inneren Ende hängen sie mit einem birnförmigen, kernhaltigen Körper *c* zusammen, der durch eine leichte Einschnürung von ihnen getrennt ist, und schon

in der folgenden Schicht liegt (Zapfenkorn nach KÖLLIKER, Kern der Zapfen nach VINTSCHGAU).

Die Zapfen stehen zwischen den Stäbchen zerstreut, an der Peripherie der Netzhaut sparsamer, nach dem gelben Fleck zu dichter. In diesem Flecke fehlen die Stäbchen ganz. In *Fig. 10* zeigt *A* eine Flächenansicht der Stäbchenansicht vom Aequator des Auges, *B* vom Rande des gelben Flecks, *C* vom gelben Flecke. Die kleineren Kreise entsprechen den Stäbchen, die grösseren den Zapfen, in ihnen sieht man den Querschnitt des Zapfenstäbchens. Wahrscheinlich ist diese Schicht diejenige, welche den Eindruck des Lichts wahrnimmt.

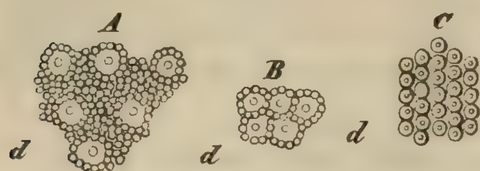


Fig. 10.

Die darauf folgenden Schichten der Netzhaut:

2) die äussere Körnerschicht (*Fig. 5,* 2)
3) die Zwischenkörnerschicht (*Fig. 5,* 3)
4) die innere Körnerschicht (*Fig. 5,* 4)
5) die feingranulirte Schicht (*Fig. 5,* 5)

bestehen aus den feinen Fasern (*Fig. 4 e*), welche von den Stäbchen und Zapfen ausgehen (radiäre Fasern, MÜLLER'sche Fasern), eingebettet in eine feinkörnige Substanz und mannigfach verästelt. Zwischen ihnen liegen die Körner (*Fig. 4 f* äussere, *g* innere Körner), 0,004 bis 0,009 Mm. im Durchmesser, mit den MÜLLER'schen Fasern verbunden.

6) Die Nervenzellenschicht(*Fig.5,*6), bestehend aus grossen, mit vielen Ausläufern versehenen Nervenzellen oder Ganglienkörpern, von denen in *Fig. 11* eine aus dem Auge des Elephanten nach CORTI abgebildet ist. Jede enthält einen Kern (*Fig. 11. a*). Die Ausläufer gehen zum Theil über in Sehnervenfasern (*Taf. I. Fig. 4* λ die Zelle, *m* eine Sehnervenfaser), zum Theil scheinen sie auch mit MÜLLER'schen Fasern in Verbindung zu stehen. Diese Schicht ist im gelben Flecke am dicksten, sie enthält hier 8 bis 10 Zellen hinter einander; nach der Peripherie der Netzhaut hin wird sie dünner, und die Zellen bilden hier keine zusammenhängende Lage mehr.

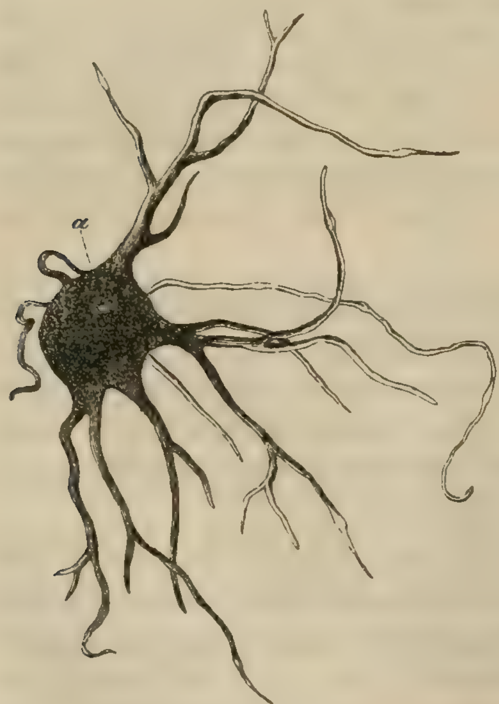


Fig. 11.

7) Die Ausbreitung des Sehnerven. Die Sehnervenfasern verbreiten sich von der Eintrittsstelle des Nerven aus radial über die ganze Netzhaut, mit Ausnahme des gelben Flecks, den sie umgehen. In der Umgebung des Nervenstamms ist diese Faserschicht natürlich am stärksten (0,2 Mm.), nach den Grenzen der Netzhaut hin wird sie dünner (am Rande 0,004 Mm.). Die Fasern gehören zu den sehr feinen Nervenfasern, welche

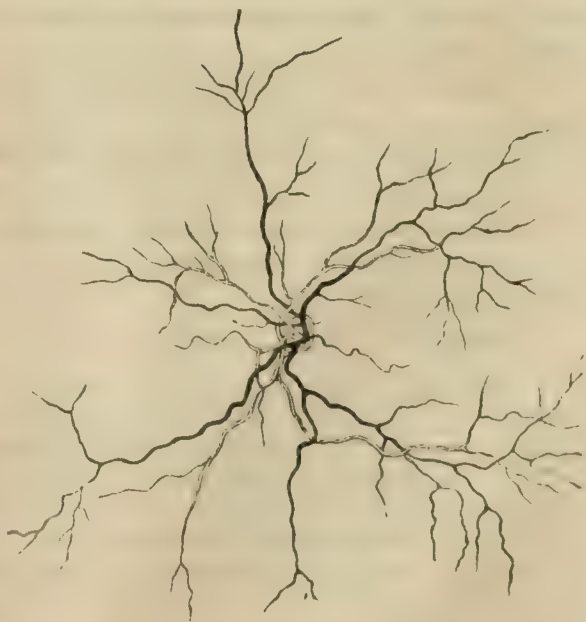
nach dem Tode gewöhnlich perlschnurartig auftreiben. Ihre Dicke ist sehr verschieden (0,0005 bis 0,0045 Mm.); über ihre Endigungen weiss man noch nichts Bestimmtes. Einige verbinden sich mit den Ausläufern der Nervenzellen, wahrscheinlich ist das mit allen der Fall.

Zwischen den Nervenfasern dieser Schicht laufen auch noch die inneren Enden der Müller'schen Fasern hindurch, welche sich hier baumförmig verästeln. Ihre letzten Enden heften sich an eine glashelle Membran, welche die Netzhaut von innen abschliesst, die *Membrana limitans*.

Der gelbe Fleck, für das Sehen der wichtigste Theil der ganzen Netzhaut, unterscheidet sich von den übrigen Theilen durch seine gelbe Farbe, welche von einem alle Theile mit Ausnahme der Stäbchenschicht durchdringenden Pigmente herrührt. Ihm fehlt die Nervenfaserschicht, und in der Stäbchenschicht finden sich nur Zapfen. In seiner Mitte befindet sich eine sehr durchsichtige vertiefte Stelle, die Netzhautgrube (*Fovea centralis*), welche leicht einreisst und daher zuweilen für eine Oeffnung gehalten wurde. Die Nervenzellenschicht ist am Umfang des gelben Flecks stärker als in sämmtlichen übrigen Theilen der Netzhaut, in der *Fovea centralis* wird sie aber wieder dünner, und erhält nur wenige Lagen von Zellen über einander; die granulöse Schicht fehlt vielleicht in der Mitte ganz. Die innere Körnerschicht und Zwischenkörnerschicht nehmen gegen den gelben Fleck hin bedeutend zu, während die äussere Körnerschicht dünner wird. In der Netzhautgrube verdünnt sich nach H. Müller auch die innere Körnerschicht. Nach Remak und Kölliker fehlen in der *Fovea centralis* alle Schichten ausser den Nervenzellen und Zapfen. Zwischen letzteren und der Aderhaut soll nach Remak hier eine intensiv gelbe glashelle Substanz liegen.

Die Verhältnisse des gelben Flecks sind trotz ihrer Wichtigkeit doch noch in vieler Beziehung nur unsicher bekannt, weil er bisher nur im menschlichen Auge gefunden worden ist, und die zarten Theile bald nach dem Tode zerreissen, so dass alle feineren Untersuchungen dieser Stelle an den Augen von Hingerichteten angestellt werden mussten, wozu natürlich nur selten Gelegenheit ist.

Auch bei der Untersuchung mit dem Augenspiegel markirt sich die Netzhautgrube durch einen besonderen Lichtreflex (s. §. 16). Sie enthält den Punkt des directen Sehens, d. h. auf ihr wird der Punkt des Gesichtsfeldes abgebildet, auf welchen wir den Blick richten.


Fig. 12.

Die Gefässe der Netzhaut treten in der Mitte des Sehnerven in das Auge (*Arteria* und *Vena centralis Retinae*) und verästeln sich von da aus baumförmig nach allen Richtungen. Anfangs liegen sie nahe unter der *Membrana limitans*, in der Schicht der Sehnervenfasern, später dringen sie auch in die der Nervenzellen

und in die feingranulirte Schicht ein, und verästeln sich in diesen beiden Schichten in ein weitmaschiges Capillargefässnetz. Die Lage und Form dieses Gefässbaums ist für gewisse optische Erscheinungen wichtig[1]; ich gebe deshalb in *Fig. 12* eine Abbildung desselben, welche von DONDERS nach einem Injectionspräparate gefertigt worden ist. Die Arterien sind hell, die Venen dunkel. In den gelben Fleck treten keine stärkeren Gefässe, in die Netzhautgrube auch keine Capillargefässe ein. Die letztere ist von einem Kranz von Endschlingen capillarer Gefässe umgeben.

An dem vorderen Rande (*Ora serrata*) geht die Netzhaut in eine Lage von Zellen über (*Pars ciliaris Retinae*), welche zugleich mit der sich ebenfalls fortsetzenden *Membrana limitans* die Ciliarfortsätze und die hintere Fläche der Iris, wo sie in Pigmentzellen überzugehen scheinen, überziehen, und diesen Theilen fest anhaften.

Da die Grössenverhältnisse der Netzhaut und ihrer Elemente für sehr viele optische Erscheinungen von grosser Wichtigkeit sind, gebe ich hier eine Zusammenstellung darauf bezüglicher Messungen verschiedener Beobachter, auf Millimeter reducirt. Ich bezeichne die Messungen von C. KRAUSE mit *Kr.*, von E. H. WEBER mit *W.*, von BRÜCKE mit *B.*, von KÖLLIKER mit *Ko.*, von VINTSCHGAU mit *V.*

Durchmesser der Eintrittsstelle des Sehnerven *Kr.* 2,7 und 2,14. *W.* 2,09 und 1,71.

Durchmesser des Gefässtrangs darin *W.* 0.704 und 0,63.

Entfernung der Mitte des Sehnerven von der Mitte des gelben Flecks *W.* 3,8. *Kr.* 3,28 und 3,6. Vom inneren Ende des gelben Flecks *Ko.* 2,25 bis 2,7.

Horizontaler Durchmesser des gelben Flecks *Kr.* 2,25. *W.* 0,76. *Ko.* 3,24.

Verticaler desgl. *Ko.* 0,81.

Durchmesser der Netzhautgrube *Ko.* 0,18 bis 0,225.

Entfernung der *Ora serrata* vom Rande der Iris an der Nasenseite *B.* 6, an der Schläfenseite 7.

Dicke der Netzhaut am Umfange des Sehnerven *Ko.* 0,22.

Desgl. an der hinteren Seite des Augapfels *Kr.* 0,164. *Ko.* 0,135.

Desgl. am Aequator *Kr.* 0,084.

Desgl. am vorderen Rande *Ko.* 0,09.

Dicke der Schichten im gelben Flecke. *Ko.*: Nervenzellen 0,101 bis 0,117; feinkörnige Schicht 0,045; innere Körnerschicht 0,058; Zwischenkörnerschicht 0,086; äussere Körnerschicht 0,058; Zapfen 0,067.

Durchmesser der Nervenzellen *B.* 0,01 bis 0,02. *Ko.* 0,009 bis 0,036, in der Regel zwischen 0,013 und 0,022.

Durchmesser der Körner *B.* 0,006 bis 0,008. *Ko.* 0,004 bis 0,009. Der Zapfenkern *V.* 0,0068.

Durchmesser der Stäbchen *B.* und *Ko.* 0,0018. *V.* 0,0010.

Länge der Stäbchen *B.* 0,027 bis 0,030. *Ko.* 0,063 bis 0,081.

Durchmesser der Zapfen *Ko.* 0,0045 bis 0,0067. *V.* 0,0034 bis 0,0068. Im gelben Flecke *Ko.* 0,0045 bis 0,0054.

Länge der Zapfen *V.* 0,015 bis 0,020.

Die neueren Hauptwerke über Structur der Netzhaut sind:

1845. F. PACINI in *Nuovi Annali delle scienze nat. di Bologna.* 1845.
1851. H. MÜLLER in SIEBOLD und KÖLLIKER's Zeitschrift für wiss. Zoologie. 1851. S. 234. — Verhandl. der Würzburger med. Ges. 1852. S. 216. Ibid. III. 336 und IV. 96.
1850. CORTI in J. MÜLLER's Archiv. 274. — Zeitschr. für wissensch. Zoologie. V. — J. HENLE in Zeitschr. für ration. Med. N. F. II. 304 u. 309.
1852. A. KÖLLIKER Verhandl. der Würzburger med. Ges. III. S. 316*.

[1] S. unten §. 15.

1853. A. Kölliker u. H. Müller *C. R. de l'Acad. d. Sc.* 1853. Septb. 23. — *Von denselben die Retinatafel in Ecker Icones physiologicae*.
R. Remak in *C. R. de l'Acad. d. Sc.* 1853. Oct. 31. und Allg. med. Centralz. 1854. Nr. 1*. Prager Vierteljahrsschr. XLIII. S. 103.
* M. di Vintschgau in Sitzber. d. Wiener Akad. XI. 943*.
1854. *A. Kölliker Mikroskopische Anatomie. Leipzig 1854. II. 648—703*.
Einige Messungen sind entnommen aus:
C. Krause Handbuch der menschlichen Anatomie. Hannover 1842. I. 2. S. 535*.
E. Brücke Anat. Beschr. des menschl. Augapfels. Berlin 1847. S. 23.
E. H. Weber in Sitzber. d. Sächs. Ges. d. Wiss. 1852. S. 149—152.

§. 5. Die Krystallinse.

Die Krystallinse ist ein durchsichtiger, farbloser, biconvexer Körper, dessen vordere Fläche weniger gewölbt ist als die hintere. Sie wird umschlossen von einer structurlosen glashellen Membran (Linsenkapsel), welche in allen Eigenschaften der Descemet'schen Membran entspricht; auch trägt sie, wie diese, vorn, wo sie von der wässrigen Feuchtigkeit bespült wird, nach Brücke ein Epithelium, welches Henle und Kölliker dagegen läugnen. Ihre hintere Hälfte ist mit der Glashaut verwachsen. Die Substanz der Linse ist in den äusseren Schichten von gallertartiger Consistenz, in der Mitte oder dem Kerne der Linse dagegen consistenter. Das Ganze bildet im frischen Zustande einen elastischen Körper, der jeder äusseren Gewalt zwar leicht nachgiebt, aber auch schnell und vollkommen seine frühere Form wieder annimmt.

Die Substanz der Linse ist doppeltbrechend. Wenn man sie zwischen zwei gekreuzten Nicol'schen Prismen betrachtet, sieht man das schwarze Kreuz mit farbigen Ringen, welches senkrecht zur optischen Axe geschnittene einaxige Krystalle zeigen.

Die Masse der Linse besteht aus einem eigenthümlichen Proteinkörper, dem Globulin oder Krystallin. Ihre mikroskopischen Elementartheile sind Fasern von sechsseitigem Querschnitt, 0,0056 bis 0,0112 Mm. breit, 0,02 bis 0,0038 Mm. dick, im Kerne fester und schmaler als in den äusseren Schichten. Ihre breitere Fläche liegt der Oberfläche der Linse parallel, daher die Linse auch leicht in dieser Richtung in zwiebelartig über einander liegende Schichten spaltet. *Fig. 13* zeigt die Querschnitte der Fasern in ihrer Zusammenlagerung, *Fig. 14* zeigt die Richtung der Schichten in einem Durchschnitte der Linse. Die Fasern haben im Allgemeinen in jeder einzelnen Schicht die Richtung von der Axe der Linse nach ihrer Peripherie hin. Nur in den der Axe näheren Theilen bilden sie, indem sie umbiegen, eigenthümliche sternförmige Figuren, wie eine solche aus den äusseren Linsenschichten in *Fig. 15* abgebildet ist. In den Kernschichten hat der Stern nur drei Strahlen, welche mit einander Winkel von 120° machen. Die Sterne der hinteren und vorderen Fläche sind um 60° gegen einander gedreht.



Fig. 13.

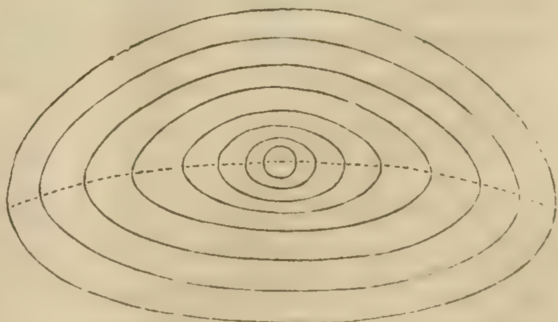


Fig. 14.



Fig. 15.

In den äusseren Schichten spalten sich dagegen die drei Hauptstrahlen der Sterne vielfach in Nebenstrahlen, so dass viel verwickeltere und unregelmässigere Figuren entstehen.

Dicht unter der Kapsel liegt statt der Fasern eine Zellenschicht, welche nach dem Tode zerfliesst und dann den *Liquor* MORGAGNII bildet. Aehnliche Zellen verbinden nach BRÜCKE auch die Faserenden in den Strahlen der Sterne wenigstens in den äusseren Schichten, während BOWMAN und KÖLLIKER hier eine structurlose Substanz annehmen. Letzterer erklärt auch die zellenähnlichen Gebilde an der hinteren Linsenfläche für geschwollene und sich gegenseitig abplattende Enden der Linsenfasern, welche sich hier an die Kapsel hefteten. In jeder Hälfte der Linse existiren also drei durch die Axe gehende Ebenen, die den Hauptstrahlen der Sterne entsprechen (*central planes*, BOWMAN), in denen die Structur der Linse abweichend ist; in den oberflächlichen Schichten theilen sich diese Flächen noch weiter. Es hängen damit wahrscheinlich gewisse Unregelmässigkeiten in der Brechung der Lichtstrahlen zusammen.

Ueber den Faserverlauf in der Linse sind wir noch keineswegs im Klaren. THOMAS[1] hat eigenthümliche Figuren beschrieben, welche die Faserenden auf Durchschnittsflächen getrockneter Linsen bilden, und welche meist aus zwei Systemen concentrischer Kreise bestehen. Diese lassen sich aus dem, was bisher über den Faserverlauf der Linse bekannt ist, noch nicht erklären.

KRAUSE erklärt in Folge seiner Messungen an der Linse ihre Vorderfläche für ein Stück eines abgeplatteten Rotationsellipsoides, die hintere für ein Rotationsparaboloid. Er giebt folgende Werthe der einzelnen Constanten für die acht in §. 2 erwähnten Augen in Pariser Linien:

Nr.	Axe: der ganzen Linse	Axe: der vorderen Hälfte	Axe: der hinteren Hälfte	Vorderfläche: Halbe Axe der Ellipse, grosse	Vorderfläche: Halbe Axe der Ellipse, kleine	Vorderfläche: Entfernung von der Hornhaut	Hinterfläche: Parameter	Hinterfläche: Entfernung von der Netzhaut	Durchmesser.
I.	2	0,85	1,15	2,05	0,95	1,2	4,49	6,65	4,1
II.	1,9	0,78	1,1	2	0,91	1,35	4,99	6,8	4
{III.	2,4	0,98	1,42	2	1,14	1,25	4,99	6,1	4,1
}IV.	2,2	0,95	1,25	2,05	1,10	1,35	4,51	5,9	4,1
{V.	1,85	0,65	1,2	2,03	0,83	1,25	4,83	6,4	4
}VI.	2,35	0,8	1,55	1,95	0,98	1,2	4,53	6,0	4,1
{VIII.	1,8	0,78	1,02	2,03	0,95	1	4,09	6,65	4
}VII.	1,85	0,85	1	2	0,94	1	3,79	6,55	4

Ich habe KRAUSE's Angaben über die Entfernung der Linsenflächen von der Hornhaut und Netzhaut hier mit angegeben, habe aber schon früher bemerkt, dass ich ihre Richtigkeit für

[1] Prager med. Vierteljahrsschr. 1854. Bd. I. Ausserord. Beilage S. 1.

sehr zweifelhaft halte. Auch in Beziehung auf die Dicke der Linse stimmen meine an lebenden Augen angestellten Messungen nicht mit denen an todten Linsen. Da die Dicke der Linse übrigens beim Sehen in die Nähe und Ferne sich verändert, werde ich meine darauf bezüglichen Untersuchungen erst bei der Lehre von der Accommodation §. 12 auseinandersetzen.

Ueber den Bau der Linse:

1845. A. Hannover in J. Müller's Archiv. 1845. S. 478*.
1846. Harting in van de Hoeven en de Vriese Tijdschrift XII. S. 1.
1847. *E. Brücke Beschr. d. menschl. Augapfels. Berlin. S. 27—30*.
1849. W. Bowman *Lectures on the parts concerned in the oper. on the eye.* London.
1851. H. Meyer in J. Müller's Archiv 1851. 202*.
1852. Gros in *C. R. de l'Acad. d. Sciences.* 1852. Avril.
1854. *A. Kölliker Mikroskopische Anatomie. Leipzig. II. 703—713*.
Thomas in Prager medic. Vierteljahrsschrift. 1854. Bd. I. Ausserord. Beil. S. 1*.

§. 6. Wässrige Feuchtigkeit und Glaskörper.

Die wässrige Feuchtigkeit (*Humor aqueus*) füllt den Raum zwischen der Hornhaut, Iris und Linse aus. Den Raum, welcher zwischen der hinteren Fläche der Hornhaut, der vorderen Fläche der Iris und der Pupillarebene liegt, nennt man die vordere Augenkammer. Den Raum dagegen, den man zwischen der Pupillarebene, der hinteren Fläche der Iris und der vorderen Fläche der Linse vorhanden glaubte, nannte man hintere Augenkammer; indessen ist dies in der That im normalen Zustande nur eine capillare Spalte, indem die hintere Fläche der Iris der vorderen der Linse dicht anliegt. Nur bei starker künstlicher Erweiterung der Pupille durch Belladonna scheint sich die Iris von der Linse zu entfernen.

Die wässrige Feuchtigkeit füllt also die vordere Augenkammer. Sie ist klar, farblos und besteht aus Wasser, welches etwa 2 Proc. fester Stoffe, nämlich Kochsalz und Extractivstoffe, enthält. Sein Brechungsverhältniss ist kaum von dem des Wassers unterschieden.

Der Raum des Augapfels, welcher zwischen der Linse und der Netzhaut liegt, ist vom Glaskörper (*Corpus vitreum, Humor vitreus*) ausgefüllt, welcher von der Glashaut (*Membrana hyaloidea*) umschlossen wird. Der Glaskörper bildet eine gallertartige Masse von wenig Zusammenhang. Wenn man ihn zerschneidet, tropft eine dünne, nicht Faden ziehende Flüssigkeit aus. Diese reagirt alkalisch, und enthält 1,69 bis 1,98 Proc. feste Theile, von denen die Hälfte aus unorganischen Stoffen (Kochsalz, wenig kohlensaures Natron, Spuren von Kalk, Schwefelsäure und Phosphorsäure) besteht. Der organische Theil des Inhalts scheint hauptsächlich Schleimstoff zu sein, und enthält Spuren einer Proteinverbindung. Auch das Brechungsverhältniss des Glaskörpers unterscheidet sich kaum von dem des Wassers, ist aber etwas höher als das der wässrigen Feuchtigkeit.

Bei Embryonen hat der Glaskörper einen zelligen Bau, später aber findet man von den Zellen nur einzelne Reste, Membranen, Körnerchen, körnige Massen, welche sich darin, wenn auch nicht ganz frei, bewegen. Seine Consistenz verdankt der Glaskörper wahrscheinlich einer geringen Menge einer stark aufgequollenen organischen Substanz (Schleimstoff oder Faserstoff). Geringe Mengen Faserstoff, welche sich aus hydropischen Flüssigkeiten abscheiden, geben oft ähnliche leicht bewegliche Gallerten, aus denen die Flüssigkeit ausläuft, wenn man

den Zusammenhang des Gerinnsels mechanisch zerstört. Lässt man den Glaskörper in Reagentien, welche den Schleimstoff niederschlagen, z. B. in Lösungen von essigsaurem Bleioxyd oder Chromsäure erhärten, so findet man auf Durchschnitten zuweilen regelmässige Streifungen, von denen es aber noch höchst zweifelhaft ist, ob sie Membranen entsprechen, welche sich durch den Glaskörper hinziehen.

Hannover nimmt auf Grund dieser Streifungen an, dass im menschlichen Glaskörper ebene Membranen vorkommen, und sich alle in einer Linie schneiden, die vor der Eintrittsstelle des Sehnerven nach der hinteren Fläche der Linse hinübergeht, und dass die Membranen sich von dieser Linie nach dem äusseren Umfang des Glaskörpers hinüberziehen und dort ansetzen, so dass der Bau des Glaskörpers ähnlich dem einer Apfelsine sein würde.

Bei den entoptischen Erscheinungen werde ich die Schlüsse besprechen, welche man daraus auf die Structur des Glaskörpers machen kann.

Die **Glashaut** ist eine sehr feine, glashelle, structurlose Membran, welche im hinteren Theile des Auges der *Membrana limitans* der Netzhaut anliegt, und ihr im Leben überall [1], nach dem Tode nur an der Eintrittsstelle des Sehnerven und an der *Ora serrata* fest anhaftet. Von der *Ora serrata* setzt sie sich, dünner geworden, fort bis zur hinteren Fläche der Linsenkapsel, mit der sie verschmilzt (*Taf. I. Fig. 1. k*), während sich zwischen sie und den Ciliartheil der Netzhaut noch eine andere Membran einschiebt, die *Zonula Zinnii* (*Ligamentum suspensorium lentis*), welche von manchen Anatomen als ein vorderes Blatt der Glashaut bezeichnet wird.

Die Zonula ist wie eine Halskrause gefaltet, so dass sie der Oberfläche der Ciliarfortsätze folgt. Der vordere oder äussere Rand ihrer Falten liegt fest mit der *Membrana limitans* verbunden in der Tiefe zwischen den Falten der Ciliarfortsätze, der hintere oder innere Rand ihrer Falten, welcher den Gipfeln der Ciliarfortsätze entspricht, nähert sich der Glashaut. In *Taf. I. Fig. 1* ist die Zonula durch die Linie *e* bezeichnet. Rechts fällt sie zwischen zwei Ciliarfortsätze, links zieht sie über den Gipfel eines solchen Fortsatzes hin. In dieser Weise gelangt sie zum Rande der Linse, und setzt sich in einer gewellten Linie an deren Kapsel fest. In *Fig. 16* ist ein Quadrant der Linse, projicirt auf eine durch die Axe *a b* der Linse gelegte Ebene, dargestellt. Die Ansatzlinie der Glashaut ist mit *c d* bezeichnet. Davor sieht man die gezackte Ansatzlinie der Zonula.

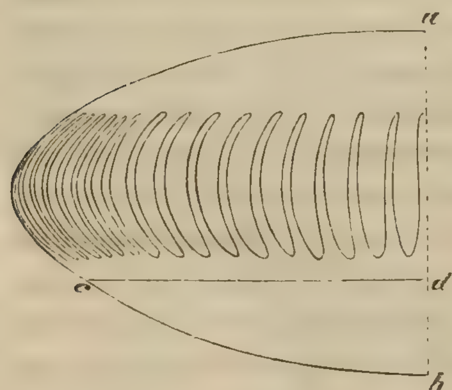


Fig. 16.

Der spaltenförmige Raum zwischen der Zonula und Glashaut wird *Canalis* Petiti genannt. Wenn man ihn aufbläst, nachdem man die Zonula von vorn frei gelegt hat, treten die eingestülpten Falten der Zonula gewölbt heraus, und das Ganze bekommt das Ansehn einer jonischen Eierleiste; daher nannte ihn sein Entdecker Petit auch *Canal godronné*. Bei stärkerem Blasen zerreissen die

[1] Vintschgau in Sitzber. d. Wiener Akad. XI. 943. u. Burow in J. Müller's Archiv. 1840.

hervorgestülpten Theile der Membran, und es bleiben nur die vorderen Faltenränder wegen ihrer grösseren Festigkeit als Stränge stehen, welche die Linse an den Glaskörper anheften. Diese vorderen Faltenränder sind übrigens fest verbunden mit dem Ciliartheile der Netzhaut, der in der Tiefe zwischen den Ciliarfortsätzen hinzieht, und letzterer haftet wieder der Pigmentschicht fest an. Hier finden sich auch Faserzüge vor, welche nach Brücke aus den Fasern herstammen, zwischen welche die Nervenzellen der Netzhaut eingebettet sind. Diese drängen sich in der *Ora serrata* an den Stellen zusammen, die den Zwischenräumen je zweier Ciliarfortsätze entsprechen, und ziehen im Grunde dieser Zwischenräume nach vorn. Die Zonula selbst erklärt Brücke für eine structurlose Membran, während Henle und Kölliker sie selbst für faserig erklären. Gegen Reagentien sind die Zonula und ihre Fasern so resistent wie elastisches Gewebe.

Die Zonula sichert die Stellung der Linse, indem sie diese an den Ciliarkörper heftet, und kann auch, wenn sie gespannt ist, auf den Aequatorialrand der Linse einen Zug ausüben, welcher die Aequatorialdurchmesser der Linse verlängert, ihre Dicke in der Axe verringert, und ihre Flächen abplattet.

Ueber den Bau des Glaskörpers:
Pappenheim Specielle Gewebelehre des Auges. 1842. S. 181.
E. Bürcke in J. Müller's Archiv. 1843. S. 345 und 1845. S. 130.
Hannover ebendas. 1845. S. 467 und in: Das Auge. Leipzig 1852.
Bowman in *Dublin Quarterly Journal of Med. Science.* 1848. Aug.; auch in *Lectures on the Parts conc. in the oper. on the eye.* London 1849. p. 94.
*E. Brücke Beschr. d. menschl. Augapfels. Berlin 1847.
Virchow in Verhandl. d. Würzburger phys. med. Ges. II. 1851. 317 und in Archiv für pathol. Anat. IV. 468 und V. 278.
*Kölliker Mikrosk. Anatomie II. 713.
Donders en Jansen in Nederlandsch Lancet 1846. II. 454.
*A. Doncan De corporis vitrei structura. Dissert. Utrecht 1854. Abgedr. in Onderzoekingen ged. in het physiol. Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. S. 172.

§. 7. Umgebung des Auges.

Der Augapfel liegt, in lockeres Fettzellgewebe eingebettet, in der knöchernen Augenhöhle (*Orbita*). Diese hat eine nahehin kegelförmige Gestalt. Die Grundfläche des Kegels ist die vordere Oeffnung der Orbita in der Gesichtsfläche, die Spitze des Kegels liegt nach hinten und etwas nach einwärts. In *Fig. 17* ist die Lage der Augen in den beiden Augenhöhlen dargestellt. Aus der hinteren Seite des Augapfels rechts sieht man den Sehnerven *n* hervortreten, welcher durch ein in der Spitze der Augenhöhle gelegenes Loch *o* (*Foramen opticum*) in die Schädelhöhle eintritt, um sich hier bei *m* im *Chiasma nervorum opticorum* mit dem der anderen Seite zu vereinigen und zu kreuzen. Die Fortsetzungen der Sehnerven vom Chiasma bis zum Gehirn nennt man die *Tractus optici*. Die Fasern eines jeden *Tractus opticus* gehen theils in den Sehnerven derselben, theils in den der entgegengesetzten Seite über, ein kleiner Theil auch durch den *Tractus opticus* der anderen Seite nach dem Gehirne zurück. Auch haben einige Beobachter Fasern gefunden, welche von dem einen Sehnerven durch das Chiasma in den anderen übergehen.

In der Augenhöhle liegen ferner sechs zur Bewegung des Augapfels bestimmte Muskeln, nämlich

1) der innere gerade *i* und

2) der äussere gerade *a*. Beide entspringen am Umfange des *Foramen opticum* in der Spitze der Augenhöhle, und setzen sich an die innere und äussere Seite des Augapfels. Sie drehen ihn um seine verticale Axe.

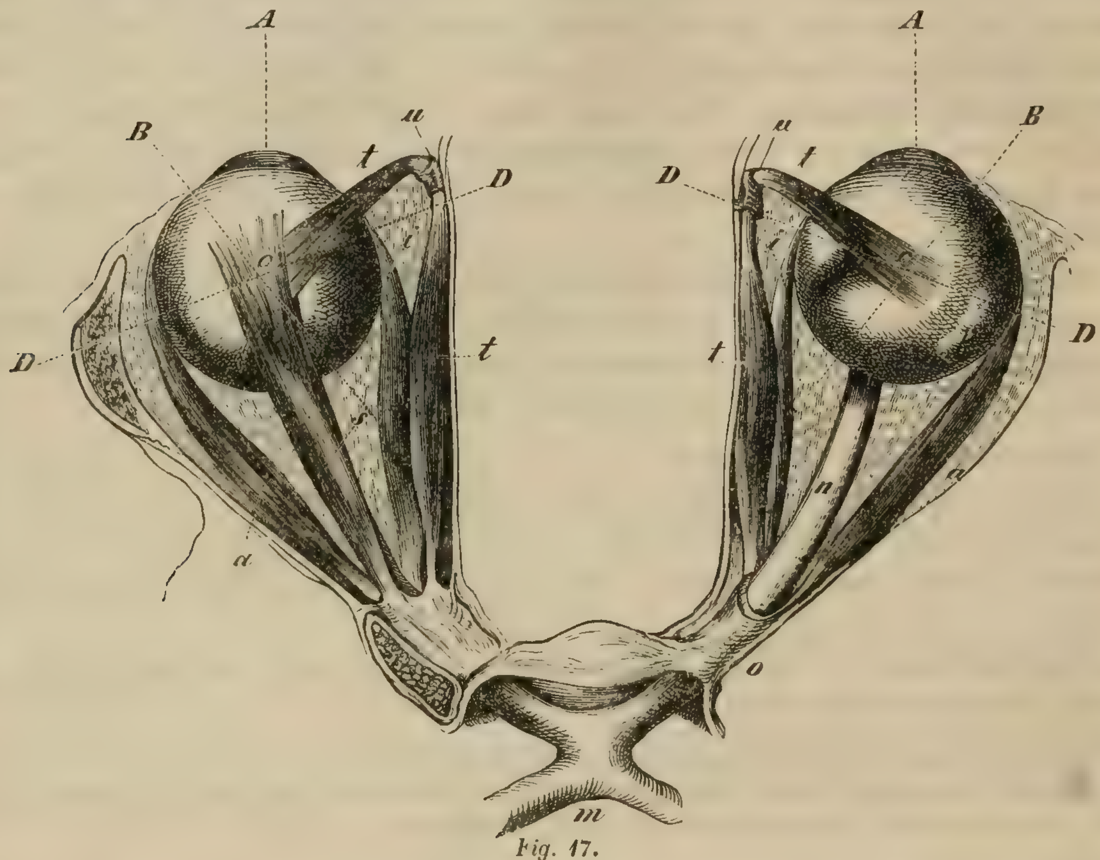


Fig. 17.

3) Der obere gerade in *Fig. 17* rechts weggenommen, um den Sehnerven zu zeigen, links mit *s* bezeichnet, und

4) der untere gerade, welcher ebenso auf der unteren Seite der Orbita liegt, wie der obere hier auf der oberen sichtbar ist. Sie entspringen ebenfalls vom Umfange des *Foramen opticum* und heften sich an die obere und untere Seite des Augapfels. Sie drehen ihn um eine horizontale Axe, welche von der Nasenseite und etwas nach vorn herübergeht nach der Schläfenseite und etwas nach hinten, und in *Fig. 17* mit *D D* bezeichnet ist. Diese Axe bildet einen Winkel von etwa 70° mit der Axe des Auges *A*.

5) Der obere schiefe Muskel *t* entspringt vom Rande des *Foramen opticum*, läuft an der inneren oberen Seite des Augenhöhle nach vorn, seine Sehne geht durch eine kleine Schleife *u* (*trochlea*), die am oberen vorderen Rande der Augenhöhle befestigt ist, biegt hier um und heftet sich an die obere Seite des Augapfels, bei *C*. Der Muskel übt einen Zug in Richtung seiner Sehne aus.

6) Der untere schiefe Muskel, in der Figur nicht sichtbar, entspringt vom inneren vorderen Umfange der Augenhöhle, läuft unter dem Augapfel nach der Schläfenseite herüber und befestigt sich am äusseren hinteren Umfange des

Augapfels bei *v Fig. 17.* Die Drehungsaxe *B B* für die schiefen Augenmuskeln läuft ebenfalls horizontal von aussen und vorn nach innen und hinten, und macht mit der Drehungsaxe des oberen und unteren geraden Muskels einen Winkel von etwa 75, mit der Axe des Auges einen von 35°.

Durch verschiedenartig combinirte Wirkung dieser sechs Muskeln kann die Augenaxe nach jeder beliebigen Richtung gewendet, und auch der Augapfel um die Augenaxe gedreht werden. Wenn wir hier für je zwei Muskeln eines Paares eine gemeinschaftliche Drehungsaxe angenommen haben, so scheint diese Annahme wenigstens vorläufig als erste Annäherung erlaubt zu sein, und vereinfacht die Uebersicht der Bewegungen, welche die Augenmuskeln auszuführen haben, ungemein.

Nach vorn ist der Augapfel geschützt durch zwei Deckplatten, die Augenlider (*Palpebrae*). Jedes von ihnen schliesst ein Knorpelplättchen ein, welches auf der äusseren Seite von der äusseren Haut überzogen ist, auf der inneren von einer Schleimhaut, die von dort auf den Augapfel übergeht, Bindehaut des Auges (*Conjunctiva*). Sie ist an die weisse Sehnenhaut des Augapfels locker angeheftet, nur am Rande der Hornhaut verschmilzt sie fast mit ihr. Die Oberfläche der Bindehaut und die vordere Fläche der Hornhaut werden von drei verschiedenen Secreten fortwährend befeuchtet. Diese sind 1) das Secret der Meibom'schen Drüsen, welche an der inneren Fläche der Augenlider unter der Bindehaut liegen. Ihre Ausführungsgänge öffnen sich längs der hinteren Kante der Augenlidränder. Dieses fettige Secret haftet meistens wohl nur an den Rändern der Lider, und verhindert das Ueberfliessen der wässrigen Thränen; es kann sich aber auch in öligen Tropfen über die Hornhaut verbreiten, namentlich bei starken Bewegungen der Lider. 2) Der Schleim der Schleimdrüsen der Bindehaut, welche am zahlreichsten am Rande der Falten zwischen den Lidern und dem Augapfel sich vorfinden. 3) Die Thränenflüssigkeit, abgesondert von den Thränendrüsen, von denen je zwei auf jeder Seite im oberen äusseren Theile der Augenhöhle liegen. Sie ergiessen ihr wässriges Secret, welches nur etwa 1 Proc. feste Substanzen enthält, durch 7 bis 10 feine Ausführungsgänge oberhalb des äusseren Augenwinkels zwischen das obere Lid und den Augapfel. Von hier verbreitet es sich über die ganze Fläche der Conjunctiva, und wird am inneren Augenwinkel durch zwei feine Oeffnungen, die Thränenpunkte, aufgenommen, die Mündungen der beiden Thränenkanälchen, welche es in einen weiteren Kanal, *Ductus nasolacrymalis*, und endlich in die Nase führen.

Die Bindehaut des Auges ist ausserordentlich empfindlich. Jede leiseste Berührung eines fremden Körpers erregt Schmerz und eine unwillkürliche Bewegung der Augenlider, das Blinzeln. Dadurch und durch die fortdauernd über die Bindehaut hinsickernde Thränenfeuchtigkeit wird die vordere Fläche der Hornhaut stets rein und glänzend erhalten, was ein nothwendiges Erforderniss für ein deutliches Sehen ist. Grössere in der Luft schwebende Staubtheilchen, Insekten u. s. w. werden ausserdem durch die Wimpern abgefangen.

Physiologische Optik.

§. 8. Eintheilung des Gegenstandes.

Die physiologische Optik ist die Lehre von den Wahrnehmungen durch den Gesichtssinn. Wir sehen die Objecte der Aussenwelt durch Vermittelung des Lichts, welches von ihnen her in unser Auge fällt. Dies Licht trifft die Netzhaut, einen empfindungsfähigen Theil unseres Nervensystems, und regt in ihr Empfindungen an. Die Empfindungen, durch den Sehnerven dem Gehirne zugeleitet, werden die Veranlassung, dass unser Bewusstsein die Vorstellung von gewissen im Raume vertheilten Gegenständen fasst.

Demgemäss zerfällt die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen in drei Abschnitte:

1) Die Lehre von den Wegen des Lichts im Auge. Da wir darin hauptsächlich mit Brechungen der Lichtstrahlen und nur ausnahmsweise mit spiegelnder oder diffuser Reflexion zu thun haben, können wir diesen Theil auch die Dioptrik des Auges nennen.
2) Die Lehre von den Empfindungen des Sehnervenapparats, in welcher die Empfindungen behandelt werden, ohne Bezug zu nehmen auf die Möglichkeit, äussere Objecte durch sie zu erkennen.
3) Die Lehre von dem Verständnisse der Gesichtsempfindungen, welche von den Vorstellungen handelt, die wir auf Grund der Gesichtsempfindungen über die Objecte der Aussenwelt uns bilden.

Die physiologische Optik unterscheidet sich also von der physikalischen Optik dadurch, dass erstere die Eigenschaften und Gesetze des Lichts nur in so fern behandelt, als sie zu den Gesichtswahrnehmungen in Beziehung stehen, während die physikalische Optik die Eigenschaften und Gesetze des Lichts untersucht, welche ihm unabhängig vom menschlichen Auge zukommen. Wenn die letztere auf das Auge Rücksicht nimmt, so benutzt sie es nur als experimentelles Hülfsmittel, als das bequemste Reagens, um das Dasein und die Verbreitung des Lichts zu erkennen und Licht verschiedener Art zu unterscheiden.

Für diejenigen meiner Leser, welchen die Resultate der physikalischen Optik nicht vollständig geläufig sind, schalte ich hier einen kurzen Abriss der wesentlichen Eigenthümlichkeiten des Lichts ein, welche für die physiologische Optik von Wichtigkeit sind, und gebe die Definitionen der physikalischen Begriffe, mit denen wir in der Folge zu thun haben werden.

Das Licht wird von der Mehrzahl der Physiker als eine eigenthümliche Bewegungsform eines hypothetischen Mediums, des Lichtäthers, angesehen, und wir wollen uns dieser Ansicht, der Undulationstheorie, die sehr vollständig von allen Erscheinungen Rechenschaft giebt, anschliessen.

Die Art der Bewegung der Aethertheilchen längs eines Lichtstrahls, welche die Undulationstheorie ihren Folgerungen zu Grunde legt, versinnlicht man sich am leichtesten, wenn man einen nassen Faden oder eine feine Kette *A B*

Fig. 18, indem man sie am oberen Ende bei *A* mit der Hand fasst, senkrecht herabhängen lässt, und nun die Hand seitlich hin und her bewegt. Der Faden biegt sich dann zu einer Wellenlinie, wie sie durch die gestrichelte Linie der Figur angedeutet ist, welche Wellenlinie fortdauernd vom oberen zum unteren Ende herabläuft. Bei den Wellen, die sich längs des Fadens von oben nach unten fortpflanzen, bleibt jedes einzelne Theilchen des Fadens immer in gleicher Höhe über dem Boden, wobei es entweder in geraden Linien von rechts nach links, oder von vorn nach hinten hin und her schwanken, oder in horizontalen, kreisförmigen oder elliptischen Bahnen um seine mittlere Gleichgewichtslage sich bewegen kann, je nachdem sich die Hand, welche den Faden hält, von rechts nach links, oder von vorn nach hinten, oder in geschlossenen krummen Linien bewegt.

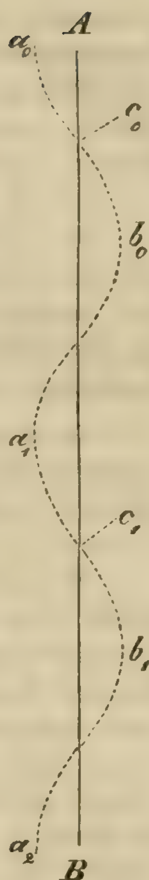


Fig. 18.

Ganz ähnlich der Bewegung der einzelnen Theile des Fadens würde die Bewegung einer Reihe von Aethertheilchen sein, längs welcher sich ein Lichtstrahl fortpflanzt. Jedes einzelne Theilchen des Aethers bleibt fortdauernd in der Nähe seiner ursprünglichen Ruhelage, und bewegt sich in geraden oder gekrümmten Bahnen um diese. Was sich als Licht fortbewegt, sind nicht die Aethertheilchen selbst, sondern nur die Wellenform, in welche sie sich während ihrer Bewegung ordnen, mit ihren verschiedenen Abwechselungen (Phasen) von Ausweichung und Geschwindigkeit.

Die Bahnen der Aethertheilchen bei der Lichtbewegung liegen in Ebenen, welche senkrecht gegen die Fortpflanzungsrichtung der Wellen sind, ganz wie bei unserem Faden, wo die Wellen in verticaler Richtung nach dem Boden hin laufen, und jeder einzelne Theil des schwingenden Fadens stets in gleicher Höhe über dem Boden eine horizontale Bahn beschreibt. Dadurch unterscheiden sich die Lichtwellen von den Wellen elastischer Flüssigkeiten, z. B. von der Schallbewegung der Luft, bei welcher die Theilchen parallel der Fortpflanzungsrichtung oscilliren.

Wenn die Bahn der schwingenden Aethertheilchen in einem Lichtwellenzuge geradlinig ist, nennt man das Licht geradlinig polarisirt, wenn die Bahn kreisförmig oder elliptisch ist, nennt man das Licht dagegen kreisförmig oder elliptisch polarisirt, wobei die Drehung rechts oder links herum geschehen kann. Zwei geradlinig polarisirte Strahlen, deren Schwingungsrichtungen auf einander senkrecht stehen, nennt man senkrecht gegen einander polarisirt. Das natürliche Licht, wie es von leuchtenden Körpern ausgeht, verhält sich meist wie eine gleichmässige Mischung von allen Arten verschieden polarisirten Lichts; man nennt solches unpolarisirt. Erst durch die Brechung und Spiegelung des Lichts erhält man Licht, in welchem eine Art der Polarisation überwiegt, oder allein vorkommt.

Wenn jedes Aethertheilchen bei der Lichtbewegung immer genau in derselben Zeit denselben Weg mit derselben Geschwindigkeit wiederholt durchläuft, nennt man das Licht einfach, einfarbig oder homogen, und die Zeit, in der es seinen Weg einmal zurücklegt, heisst die Schwingungsdauer. Die auffallendste Eigenthümlichkeit, durch welche sich Licht verschiedener Schwingungsdauer von einander unterscheidet, ist die Farbe. Das natürliche Licht der leuchtenden Körper ist meistens nicht einfaches Licht von constanter Schwingungsdauer, sondern enthält Wellenzüge von einer unendlichen Menge continuirlich in einander übergehender Werthe der Schwingungsdauer. Man nennt solches Licht gemischtes oder zusammengesetztes Licht. Das weisse Licht der Sonne ist gemischtes Licht. Einfaches Licht kann man am besten durch Brechung in durchsichtigen Prismen aus dem ge-

mischten ausscheiden, indem nach der Brechung die Wellenzüge verschiedener Schwingungsdauer in verschiedenen Richtungen sich fortpflanzen. Wir können also die Bewegung in einem Strahle natürlichen Lichts vergleichen mit der Bewegung, welche unser Faden annehmen würde, wenn die Hand, welche ihn hält, unregelmässige Bewegungen sowohl der Dauer als der Richtung nach ausführt, bei denen sie sich aber nie weit von ihrer mittleren Lage entfernt.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtwellen ist ausserordentlich gross. Für den Weltenraum ist sie durch astronomische Beobachtungen bestimmt worden, und beträgt hier 310177,5 Kilometer (41179 preussische Meilen) in der Secunde. In durchsichtigen Körpern ist sie geringer, und in diesen meistens, mit einziger Ausnahme der Gasarten, nicht ganz gleich für Licht verschiedener Schwingungsdauer.

In krystallisirten Körpern, oder solchen, deren moleculärer Bau nach verschiedenen Richtungen hin verschieden ist (doppeltbrechenden Körpern), ist die Fortpflanzungsrichtung auch für verschiedene Richtungen der Fortpflanzung und der Polarisation verschieden.

Wenn längs der Linie *A B Fig. 18* ein einfacher, geradlinig polarisirter Lichtstrahl sich fortpflanzt, so ordnen sich die Aethertheilchen, welche anfangs in der geraden Linie *A B* lagen, in eine Wellenlinie $a_0\, b_0\, a_1\, b_1\, a_2$, welche sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortschiebt, und wechselnde Ausbiegungen nach rechts und nach links von gleicher Länge zeigt. Die Länge von zwei solchen Ausbiegungen, $c_0\, c_1$, oder überhaupt die Entfernung je zweier entsprechender Punkte auf zwei nächst auf einander folgenden, nach gleicher Richtung hin gebogenen Theilen der Wellenlinie nennt man die Wellenlänge. Während nun der Gipfel des Wellenbergs von a_0 bis a_1 sich fortschiebt, muss bei *A* ein neuer Gipfel der Linie angekommen sein, und das Aethertheilchen bei *A* muss eine ganze Schwingungsdauer vollendet haben. Während der Zeit einer Schwingungsdauer pflanzt sich also das Licht um eine Wellenlänge fort, d. h. die Wellenlänge ist gleich der Schwingungsdauer, multiplicirt mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Daraus folgt, dass bei Licht von gleicher Schwingungsdauer in durchsichtigen Mitteln verschiedener Art die Wellenlänge der Fortpflanzungsgeschwindigkeit proportional sein muss, und dass die Wellenlängen in dichteren durchsichtigen Medien im Allgemeinen kleiner sind als im leeren Raume.

Die Wellenlängen kann man mit Hülfe der Phänomene der Interferenz messen und daraus die Schwingungsdauer des betreffenden Lichts berechnen. Die Phänomene der Interferenz beruhen darauf, dass zwei Lichtstrahlen sich gegenseitig verstärken, wenn sie gleichgerichtete Aetherbewegungen, sich aber aufheben, wenn sie entgegengesetzt gerichtete hervorbringen. Zwei Theile eines Lichtstrahls, welche nach verschiedenen Wegen sich wieder vereinigen, verstärken sich also, wenn ihre Wege gar nicht, oder um ein, zwei, mehrere ganze Wellenlängen unterschieden sind, und sie heben sich auf, wenn die Wege um eine ungerade Zahl halber Wellenlängen unterschieden sind. Aus solchen Phänomenen dsr Interferenz hat man nun gefunden, dass die Lichtwellenlängen im leeren Raume 14 bis 25 Milliontheile eines Pariser Zolls (0,00039 bis 0,00069 Mm.) betragen, und daraus für die Zahl der Schwingungen in der Secunde 451 bis 789 Billionen gefunden.

Die Erschütterungen, welche ein leuchtender Punkt in einem einfach brechenden Mittel dem umgebenden Aether mittheilt, pflanzen sich von ihm aus gleichmässig und mit gleicher Geschwindigkeit nach allen Richtungen fort. Dadurch entsteht eine kugelförmige Ausbreitung der Welle, wobei die Excursionen der schwingenden Aethertheilchen in dem Verhältnisse abnehmen, wie der Radius der Welle wächst. Die Intensität des Lichts aber, welche dem Quadrate der Excursionen proportional zu setzen ist, verhält sich demnach in verschiedenen Entfernungen umgekehrt wie das

Quadrat der Entfernung vom leuchtenden Punkte. Bei einer solchen räumlichen Ausbreitung der Lichtbewegung nennt man eine Fläche, in der Aethertheilchen liegen, die alle in derselben Phase der Schwingung begriffen sind, eine Wellenfläche.

Ich habe noch den Begriff des Lichtstrahls zu erörtern Seine mathematische Definition ist die, dass er eine auf den Wellenflächen senkrechte Linie sei; haben wir es also mit kugelig sich verbreitenden Wellen zu thun, so ist er ein Radius der concentrischen Kugelflächen, und behält seine Richtung so lange bei, als die Lichtbewegung in demselben durchsichtigen Medium ungestört fortschreitet. Wenn wir nun die Bewegung der längs eines Strahls gelegenen Aethertheilchen betrachten, so ist dieselbe streng genommen allerdings nicht unabhängig von der Bewegung der Theilchen in benachbarten Strahlen. Indessen haben Störungen in diesen benachbarten Bewegungen durch dunkle Körper u. s. w. unter den gewöhnlich stattfindenden Bedingungen, mit denen wir es auch namentlich im Auge allein zu thun haben, keinen beträchtlichen Einfluss auf die Bewegungen der Theile des ersten Strahls. Wir können also in solchen Fällen die Bewegung der Aethertheilchen innerhalb eines Strahls annähernd als ein abgeschlossenes mechanisches Ganze ansehen, welches unabhängig von den Bewegungen der benachbarten Strahlen von Statten geht. Dadurch wird die theoretische Untersuchung der Lichtbewegungen ausserordentlich vereinfacht und erleichtert. So sind wir denn auch im täglichen Leben gewöhnt vorauszusetzen, dass jeder Lichtstrahl geradlinig fortschreite, ungehindert durch das, was seitlich von ihm geschieht, und in der That sind die Abweichungen von dieser Regel in den gewöhnlich vorkommenden Fällen ganz unmerklich. Diese Auflösung der kugelförmigen Ausbreitung der Lichtwellen in linear sich fortpflanzende Strahlen ist aber namentlich dann nicht mehr erlaubt, wenn das Licht durch so kleine Oeffnungen hindurch geht, dass die Wellenlängen des Lichts nicht mehr verschwindend klein gegen deren Dimensionen sind. Dann breiten sich sehr merkliche Quantitäten des Lichts seitlich aus. Ueberhaupt sind Ablenkungen kleiner Theile des Lichts von dem geraden Wege (Diffraction) überall da zu bemerken, wo Licht an dem Rande undurchsichtiger Körper vorbeigeht. In solchen Fällen muss man auf die Bewegung der ganzen Lichtwellen zurückgehen, um die Phänomene zu erklären. Für die Physik des Auges können wir dagegen die Bewegung des Lichts unbedenklich als geradlinig betrachten, so lange es in einem homogenen Medium sich fortpflanzt.

Licht und Schall unterscheiden sich in dieser Beziehung sehr auffallend, wenn auch eigentlich nur relativ, von einander. Die Dimensionen der uns umgebenden Körper sind meist so gross, dass die Lichtwellenlängen dagegen als verschwindend klein zu betrachten sind; deshalb bewegt sich die bei weitem grösste Menge des Lichts nur geradlinig fort, und es erfordert die Herstellung besonderer Apparate, um die seitliche Ausbreitung kleinerer Theile desselben wahrzunehmen. Die Schallwellen sind dagegen mehrere Zoll oder Fuss lang, und zeigen deshalb, wenn sie zwischen festen Körpern hindurchgehen, meist eine sehr bedeutende Seitenausbreitung. Wir wissen deshalb aus den alltäglichen Wahrnehmungen, dass wir nur in gerader Linie sehen, aber um Ecken herum hören können. Eben deshalb dürfen wir aber auch die Schallbewegung nicht in Schallstrahlen auflösen wollen, wir würden uns dadurch zu weit von den wirklichen Verhältnissen entfernen, und dasselbe ist der Grund, dass die Theorie des Schalls bis jetzt noch so wenig ausgebildet werden konnte, im Vergleiche zu der des Lichts. Demselben Umstande verdankt unser Auge die Möglichkeit, aus der Richtung der einfallenden Lichtstrahlen sehr genau auf den Ort des leuchtenden Körpers schliessen zu können, was beim Schall nur höchst unvollkommen möglich ist. Andererseits wird auch das Auge durch jeden in den Weg tretenden dunklen Körper verhindert zu sehen, was hinter ihm vorgeht, während das Ohr sehr wohl Töne vernehmen kann, die hinter ihm erregt werden. So hängen

mit der seitlichen Ausbreitung der Wellenzüge eigenthümliche Vortheile und Nachtheile beider Sinne zusammen.

Wenn Licht auf die Grenzfläche zweier verschiedenartiger durchsichtiger Mittel fällt, wird in der Regel ein Theil zurückgeworfen (reflectirt), und bleibt in dem Mittel, in welchem er war, ein anderer Theil geht in das andere Medium über, wird dabei aber in der Regel von seiner bisherigen Richtung abgelenkt, d. h. gebrochen (refrangirt). Ist die Trennungsfläche glatt (polirt), sind beide Mittel einfach brechend, so wird ein auffallender Lichtstrahl nur nach einer Richtung hin zurückgeworfen (spiegelnde Reflexion), und nur nach einer Richtung hin gebrochen. Ist die Trennungsfläche rauh, so wird das Licht, auch wenn es nur aus einer Richtung herkommt, nach vielen oder allen Richtungen hin zurückgeworfen und gebrochen, es wird zerstreut (diffuse Reflexion und Refraction).

Während das Licht in einem körperlichen Mittel sich fortbewegt, kann es entweder ungeschwächt bleiben, so weit es auch gehen mag; dann nennen wir das Mittel durchsichtig. Absolut durchsichtige Mittel giebt es vielleicht nicht ausser dem leeren Raume. Oder es kann das Licht allmälig geschwächt werden, und zwar auf zweierlei Weise. Entweder nämlich wird es von kleinen fremden Körpern, Sprüngen, Stellen mit geändertem Gefüge u. s. w. diffus zurückgeworfen und gebrochen (falsche innere Dispersion), dabei erscheint das Mittel trübe, und in seinem Inneren selbst erleuchtet. Oder das Licht verschwindet, ohne von seinem Wege abgelenkt zu werden (Absorption). Da die Absorption meistentheils die Strahlen von verschiedener Schwingungsdauer verschieden schnell verschwinden macht, so wird weisses Licht, wenn es durch absorbirende Mittel geht, meistens farbig, und das Mittel selbst erscheint gefärbt. Farblose durchsichtige Mittel sind solche, welche alle leuchtenden Strahlen ungeschwächt durchgehen lassen. Dieselben können dabei aber nicht leuchtende Strahlen absorbiren, z. B. Wärmestrahlen oder die brechbarsten Strahlen des Sonnenlichts, sich gegen solche also noch wie gefärbte Mittel gegen die leuchtenden Strahlen verhalten.

Bei der Absorption der Lichtstrahlen entstehen oft chemische Wirkungen; zuweilen wieder Licht, und wahrscheinlich immer Wärme. Wenn wieder Licht entsteht, so sendet jeder Theil des beleuchteten Mittels Licht nach allen Seiten aus, welches sich aber in der Farbe und Zusammensetzung von dem absorbirten Lichte unterscheidet, die Substanz wird selbstleuchtend. Man nennt dieses Selbstleuchten Phosphorescenz, wenn es länger dauert als die Bestrahlung, Fluorescenz oder wahre innere Dispersion, wenn es nur so lange dauert als die Bestrahlung. Bei der Fluorescenz ist das von der Substanz entwickelte Licht immer von grösserer Schwingungsdauer als das einstrahlende, seine Farbe und Zusammensetzung meist unabhängig von der des letzteren, es findet also eine Veränderung der Schwingungsdauer (Brechbarkeit) statt, und es wird dadurch möglich, das dem Auge nicht sichtbare oder kaum sichtbare Licht, dessen Schwingungsdauer kleiner ist als die des gewöhnlich sichtbaren, dem Auge sichtbar zu machen, indem man es auf eine fluorescirende Substanz (saures schwefelsaures Chinin, Uranglas, Aufguss von Rosskastanienrinde, Bernstein u. s. w.) fallen lässt.

Ich lasse hier eine Aufzählung von Werken folgen, welche die physiologische Optik im Allgemeinen betreffen:

1600. Fabricius ab aquapendente *de visione.* Ven. Fol.
1604. J. Kepler Paralipomena ad Vitellionem. Frankf. Cap. 5.
1613. Francisci Aquilonii opticorum libri sex. Antwerpiae.
1619. Scheiner Oculus sive fundamentum opticum, in quo radius visualis eruitur, sive visionis in oculo sedes cernitur et anguli visorii ingenium reperitur. Oenip.
1738. R. Smith *a complete system of optics with.* J. Jurins *essay upon distinct and indistinct vision.* Cambridge 1738. Deutsch v. Kästner. — Altenb. 1755.
1740. Le Cat *Traité de sens.* Rouen.

1746. P. Camper dissert. de visu. Lugd. Batav.
1759. Porterfield *Treatise on the eyes, the manner and phaenomena of vision.* Edinb.
1766. Haller Elementa physiologiae hum. Lausanne 1757. Bern 1766.
1819. J. Purkinje Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjectiver Hinsicht. Prag.
1825. J. Purkinje Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Bd. II. Neue Beiträge zur Kenntniss des Sehens. Berlin.
Lehot *Nouvelle théorie de la vision.* Paris.
1826. J. Müller Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig.
1828. Muncke Artikel: Gesicht und Sehen in Gehler's physikalischem Wörterbuche. Leipzig.
1830. A. Hueck Das Sehen seinem äusserem Processe nach. Dorpat u. Göttingen.
1831. D. Brewster *a treatise on optics.*
1834. C. M. N. Bartels Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes. Berlin.
1836. A. W. Volckmann Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns.
1837. J. Müller's Lehrbuch der Physiologie des Menschen. Coblenz. Bd. II. S. 276—393.
1839. F. W. G. Radicke Handbuch der Optik. Bd. II. S. 211—281.
1842. Burow Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. Berlin.
1844. Moser über das Auge in Dove's Repertorium der Physik. Berlin. Bd. V.
1845. Th. Ruete Lehrbuch der Ophthalmologie.
1846. Volckmann Artikel: Sehen in R. Wagner's Handwörterbuch d. Physiologie. Braunschweig.
1852. C. Ludwig Lehrbuch der Physiologie des Menschen. Heidelberg. Bd. I. S. 192—263.
1847—53. Brücke Berichte über physiologische Optik in Fortschritte der Physik. Bd. I. bis V.

Erster Abschnitt.

Die Dioptrik des Auges.

§. 9. Gesetze der Brechung in Systemen kugeliger Flächen.

Der Gang der Lichtstrahlen im menschlichen Auge wird hauptsächlich durch Brechung verändert. Es ist aber nicht blos eine einzelne brechende Fläche vorhanden, sondern eine Reihe von solchen. Ich werde also die allgemeinen Gesetze der Lichtbrechung in einfach brechenden Mitteln und namentlich auch der Brechung in einer Reihe von gekrümmten Flächen, welche die Grundlage des vorliegenden Abschnitts bilden, vorausschicken.

An einer einzelnen brechenden Fläche ist die Lage des zurückgeworfenen und gebrochenen Strahls in folgender Weise bestimmt. In *Fig. 19* sei *a b* die Grenzfläche beider Medien, welche man die brechende Fläche nennt; *f c* sei einer der darauf fallenden Lichtstrahlen, *d e* die im Punkte *c* auf *a b* senkrecht stehende Linie, welche man das Einfallsloth nennt, *c h* der zurückgeworfene und *c g* der gebrochene Strahl. Die Ebene, welche durch das Einfallsloth und den einfallenden Strahl zu legen ist, nennt man Einfallsebene, den Winkel zwischen dem einfallenden Strahle und dem Einfallslothe den Einfallswinkel (in der Figur ist es der Winkel *d c f*, mit α bezeichnet), den Winkel zwischen dem Einfallslothe und dem zurück-

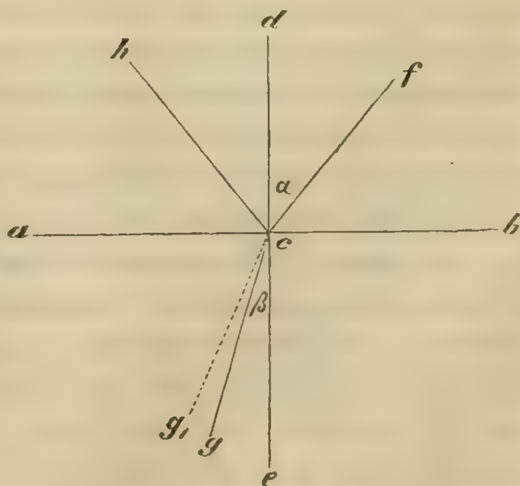


Fig. 19.

geworfenen Strahle den Reflexionswinkel (in der Figur $h\,c\,d$) und denjenigen zwischen dem Einfallslothe und dem gebrochenen Strahle ($g\,c\,e$ oder β) den Brechungswinkel. Bei einfach brechenden Medien ist dann die Lage des zurückgeworfenen und gebrochenen Strahls dadurch gegeben, dass erstens beide ebenfalls in der Einfallsebene liegen, und dass zweitens der Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel ist, der Brechungswinkel aber von dem Einfallswinkel in der Weise abhängt, dass ihre Sinus sich verhalten wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichts in den betreffenden beiden Medien. Das Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts im Vacuum zu der in einem gegebenen Mittel nennt man das Brechungsverhältniss oder Brechungsvermögen dieses Mittels. Ist also c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Vacuum, c_1 in dem ersten, c_2 in dem zweiten Mittel, n_1 das Brechungsverhältniss des ersten, n_2 das des zweiten Mittels, so ist

$$n_1 = \frac{c}{c_1}$$

$$n_2 = \frac{c}{c_2}$$

$$\frac{\sin\alpha}{c_1} = \frac{\sin\beta}{c_2} \quad \text{oder}$$

$$n_1 \sin\alpha = n_2 \sin\beta.$$

In der letzteren Form pflegt man gewöhnlich das Brechungsgesetz auszusprechen. Für das Vacuum ist das Brechungsverhältniss nach der gegebenen Definition $= 1$, für die Luft bei gewöhnlichem Drucke so wenig davon unterschieden (nämlich 1,00029 bei 0° und 0,76 Mm. Druck), dass man in den meisten Fällen den Unterschied vernachlässigen kann. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der verschiedenen einfachen farbigen Strahlen sind im Vacuum und in den Gasarten nicht von einander verschieden, wohl aber in den durchsichtigen tropfbaren und festen Körpern. In diesen pflanzen sich die Strahlen von kleinerer Schwingungsdauer (die blauen und violetten) langsamer fort als die von längerer Schwingungsdauer (gelbe und rothe), es sind also auch die Brechungsverhältnisse für die ersteren grösser als für die zweiten, und man bezeichnet deshalb auch jene (die violetten) als die brechbareren Strahlen, letztere (die rothen) als die weniger brechbaren. Wegen dieser Verschiedenheit der Brechbarkeit schlagen denn auch die verschiedenen farbigen Theile des weissen Lichts nach einer Brechung in tropfbaren oder festen Körpern im Allgemeinen verschiedene Wege ein, und es giebt dies ein Mittel ab, sie zu trennen. In der *Fig. 19* ist vorausgesetzt, dass oberhalb der brechenden Fläche sich ein dünneres, unterhalb derselben ein dichteres Medium befinde. Kommt das Licht aus dem ersteren von f her, so wird der gebrochene Strahl $c\,g$ dem Einfallslothe $c\,e$ genähert werden. Für die violetten Strahlen ist die Ablenkung stärker als für die rothen. Wenn also die violetten etwa den Weg $c\,g$ einschlagen, geht das rothe Licht des Strahls $f\,c$ in der Richtung $c\,g_1$ fort, und trennt sich somit von den brechbareren Farben.

Im Auge haben wir es mit der Brechung des Lichts an kugeligen oder nahehin kugeligen Flächen zu thun. Die Gesetze der Brechung vereinfachen sich für eine jede solche Fläche ausserordentlich, wenn das Licht nur unter sehr kleinen Einfallswinkeln, d. h. nahe senkrecht auf sie fällt. Sie vereinfachen sich auch für ein System solcher Flächen, wenn die Mittelpunkte der Kugelflächen alle in einer geraden Linie, der Axe des Systems, liegen. Systeme von kugeligen Flächen, in denen diese letzte Bedingung erfüllt ist, nennt man centrirt. Licht, welches ursprünglich von einem Punkte ausgegangen ist, oder allgemeiner, Licht, dessen Strahlen hinreichend verlängert alle durch einen Punkt gehen, d. h. homocentrisches Licht, wird, nachdem es durch ein solches System gegangen ist, und alle brechenden Flächen nur unter kleinen Einfallswinkeln getroffen hat, entweder sich in einen Punkt wieder vereinigen, oder so fortgehen, als käme es alles von einem leuchtenden Punkte her, also wieder homocentrisch sein. Den Convergenzpunkt der Lichtstrahlen nennt man in beiden Fällen das optische Bild des ursprünglich leuchtenden Punktes, oder da Lichtstrahlen, welche von dem Orte des Bildes ausgehen würden, an der Stelle des ursprünglich leuchtenden Punktes wieder vereinigt werden würden, nennt man den Ort des leuchtenden Punktes und den seines Bildes auch conjugirte Vereinigungspunkte der Strahlen. Man nennt ferner das optische Bild reell, wenn die Lichtstrahlen, welche von dem leuchtenden Punkte ausgegangen sind, in ihm wirklich zur Vereinigung kommen. Dies kann nur geschehen, wenn das Bild hinter den brechenden Flächen liegt. Man nennt es virtuell, wenn der Vereinigungspunkt der Lichtstrahlen in ihren rückwärts gezogenen Verlängerungen vor der letzten brechenden Fläche liegt. Im letzteren Falle schneiden sich also nicht die Lichtstrahlen selbst, sondern nur ihre Verlängerungen.

Convexe Glaslinsen (Brenngläser oder Sammellinsen) geben von entfernten Gegenständen reelle Bilder, wie *Fig. 20* zeigt; *c d* ist die Linse, *a* der leuchtende Punkt, die einfallenden Lichtstrahlen *a c* und *a d* werden in die Richtungen *c f* und *d e* gebrochen, vereinigen sich wirklich in dem Punkte *b*, dem Punkte des reellen Bildes, und gehen nach der Schneidung wieder divergirend auseinander, gerade als wäre *b* ein ursprünglich leuchtender Punkt.

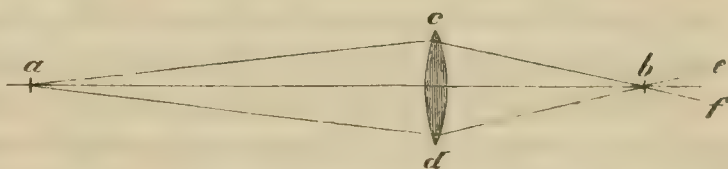


Fig. 20.

Concave Glaslinsen (Zerstreuungsgläser) geben virtuelle Bilder wie in *Fig. 21*, wo die Bezeichnungen dieselben sind wie in *Fig. 20*. Hier schneiden sich die Lichtstrahlen nicht wirklich, wohl aber ihre Verlängerungen in *b*, und gehen hinter der Linse weiter, als kämen sie von *b*, so dass ein hinter der Linse zwischen *f* und *e* stehendes Auge glauben würde, den leuchtenden Punkt in *b* zu sehen.

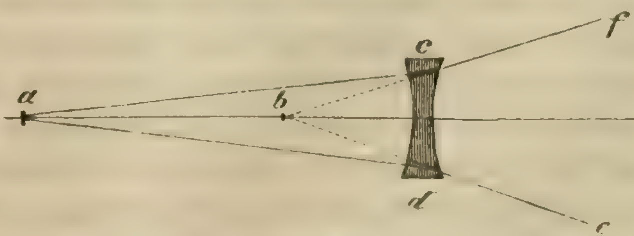


Fig. 21.

Wenn mehrere leuchtende Punkte in einer gegen die Axe des brechenden Systems senkrechten Fläche liegen, und der Axe nahe genug sind, dass ihre Strahlen auf sämmtliche brechende Kugelflächen unter sehr kleinen Einfallswinkeln treffen, so liegen ihre reellen oder virtuellen Bilder auch alle in einer auf die optische Axe senkrechten Ebene, und ihre Vertheilung in dieser Ebene ist geometrisch ähnlich der Vertheilung der leuchtenden Punkte, und gehören die leuchtenden Punkte einem Objecte an, so ist das optische Bild dieses Objects ihm selbst ähnlich.

Ein Beispiel reeller Bilder von Objecten, welches zugleich den Verhältnissen des Auges höchst ähnlich ist, giebt unter den physikalischen Instrumenten die *Camera obscura*. Ein innen geschwärzter Kasten *A* enthält in seiner vorderen Wand eine verschiebbare Röhre, in welche eine oder mehrere Glaslinsen *l* eingesetzt sind. Die Rückseite des Kastens *g* besteht aus einer matten Glastafel. Wenn man die Gläser *l* gegen entfernte erleuchtete Objecte wendet, und die matte Tafel *g* beschattet, so sieht man auf ihr ein umgekehrtes, natürlich gefärbtes Bild der Objecte entworfen, welches auch bei einer richtigen Stellung der Linsen *l* sehr scharf gezeichnet erscheint. Die Linsen müssen zu dem Ende so gewählt und gestellt sein, dass die Strahlen, welche von einem jeden einzelnen Punkte des abgebildeten Gegenstandes ausgegangen sind, sich in einem Punkte der mattgeschliffenen Glasfläche wieder vereinigen. Dann empfängt dieser Punkt der Glasfläche alles Licht, welches von dem entsprechenden Punkte des abgebildeten Gegenstandes her in das Instrument gefallen ist, und wird von ihm in derselben Farbe und entsprechender Helligkeit erleuchtet, wie sie dem Punkte des Objects zukommen. Dagegen fällt auf diese Stelle der Glastafel kein Licht, welches von irgend einem anderen Punkte des Gegenstandes ausgegangen wäre, weil solches Licht eben in anderen Punkten der Tafel sich vereinigt.

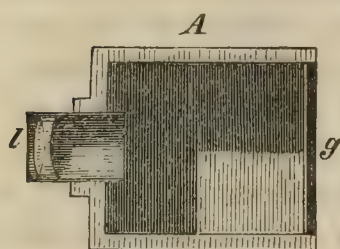


Fig. 22.

Bei diesen Beobachtungen bemerkt man zunächst, dass die Bilder ungleich von dem Instrumente entfernter Gegenstände nicht gleichzeitig deutlich auf der matten Tafel entworfen werden, dass man vielmehr die Röhre mit den Linsen etwas herausziehen muss, um nähere Gegenstände abzubilden, für entferntere dagegen mehr hineinschieben. Der Grund davon ist der, dass die Bilder ungleich entfernter Punkte auch selbst verschiedene Entfernung von den Linsen haben, also nicht gleichzeitig genau in der Ebene der matten Glastafel liegen können.

Man bemerkt ferner, wenn die Linsen einen grosen Durchmesser im Verhältniss zur Länge des Kastens haben, dass die Ränder heller Flächen in dem Bilde farbige, meist blaue oder gelbrothe Säume zeigen. Wegen der verschiedenen Brechbarkeit des verschiedenfarbigen Lichts liegen die Vereinigungspunkte verschiedenfarbiger Strahlen nicht genau in derselben Entfernung hinter der Linse, und die Bilder für die verschiedenen Farben decken sich nicht genau. Man nennt dies die chromatische Abweichung. Sie kann fast vollständig aufgehoben werden durch eine passende Verbindung von Linsen, die aus verschiedenem Stoffe

bestehen. Dergleichen optische Instrumente, in welchen so die chromatische Abweichung beseitigt ist, nennt man achromatisch.

Aber auch bei der Beleuchtung mit einfarbigem Lichte zeigen die Bilder der *Camera obscura* und anderer optischer Instrumente mit brechenden Kugelflächen bei grossen Oeffnungen der Linsen eine gewisse Ungenauigkeit der Umrisse, welche daher entsteht, dass die durch eine kugelige Fläche gebrochenen Strahlen des abgebildeten Punktes zwar nahehin, aber doch nicht absolut genau in einen Punkt wieder vereinigt werden. Nur bei verschwindend kleinen Einfallswinkeln werden sie genau vereinigt. Diese zweite Art der Abweichung nennt man die sphärische oder die Abweichung wegen der Kugelgestalt. Instrumente, in denen sie durch passende Zusammenstellung der brechenden Flächen möglichst verringert ist, nennt man aplanatisch. Vollständige Aplanasie ist durch Kugelflächen im Allgemeinen nicht zu erreichen, sondern dazu würde man andere gekrümmte Flächen und zwar Rotationsflächen des zweiten oder vierten Grades anwenden müssen, welche aber an optischen Instrumenten bisher noch nicht ausgeführt werden können.

Die Lage und Grösse der optischen Bilder, welche centrirte Systeme von kugeligen brechenden Flächen entwerfen, so wie auch der Gang eines jeden durch sie hindurchgegangenen Lichtstrahls, der sämmtliche brechende Flächen unter sehr kleinen Einfallswinkeln passirt hat, ist nach verhältnissmässig einfachen Regeln zu bestimmen, wenn man gewisse Punkte, die optischen Cardinalpunkte des Systems kennt. Es giebt drei Paare von solchen Punkten, nämlich die beiden Brennpunkte, die beiden Hauptpunkte und die beiden Knotenpunkte.

Man nenne die Seite des Systems, von der das Licht herkommt, die erste, die, nach der es hingeht, die zweite Seite, das Brechungsverhältniss des ersten Mittels sei n_1, das des letzten n_2.

Der erste Brennpunkt ist dadurch bestimmt, dass jeder Strahl, der vor der Brechung durch ihn geht, nach der Brechung parallel mit der Axe wird.

Der zweite Brennpunkt ist dadurch bestimmt, dass durch ihn jeder Strahl geht, der vor der Brechung parallel der Axe ist.

Der zweite Hauptpunkt ist das Bild des ersten, d. h. Strahlen, welche im ersten Mittel durch den ersten Hauptpunkt gehen, gehen nach der letzten Brechung durch den zweiten. Ebenen, senkrecht zur Axe durch die Hauptpunkte gelegt, heissen Hauptebenen. Die zweite Hauptebene ist das optische Bild der ersten, und zwar sind es die einzigen zusammengehörigen Bilder, welche gleich gross und gleich gerichtet sind. Durch diese Bedingung ist die Lage der Hauptpunkte bestimmt.

Der zweite Knotenpunkt ist das Bild des ersten. Ein Strahl, der im ersten Medium nach dem ersten Knotenpunkte gerichtet ist, geht nach der Brechung durch den zweiten Knotenpunkt, und die Richtungen des Strahls vor und nach der Brechung sind einander parallel.

Die Entfernung des ersten Hauptpunkts vom ersten Brennpunkte ist die erste Hauptbrennweite. Sie wird positiv gerechnet, wenn der erste Hauptpunkt im Sinne der Fortbewegung des Lichts hinter dem ersten Brennpunkte liegt.

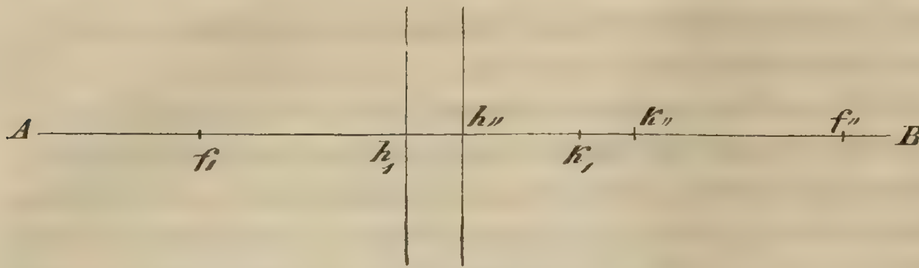


Fig. 23.

Ist also in *Fig.* 23 AB die Axe, und A die Richtung, wo das Licht herkommt, $f_{\prime}$ der erste, $f_{\prime\prime}$ der zweite Brennpunkt, $h_{\prime}$ der erste, $h_{\prime\prime}$ der zweite Hauptpunkt, $k_{\prime}$ der erste, $k_{\prime\prime}$ der zweite Knotenpunkt, so ist $f_{\prime} h_{\prime}$ die positive erste Hauptbrennweite. Dagegen $f_{\prime\prime} h_{\prime\prime}$, als die Entfernung des zweiten Brennpunkts vom zweiten Hauptpunkte, ist die zweite Hauptbrennweite, positiv gerechnet, wenn, wie in der Figur, der Brennpunkt hinter dem Hauptpunkte liegt.

Die Entfernung des ersten Knotenpunkts vom ersten Brennpunkte ist gleich der zweiten Hauptbrennweite, die des zweiten Knotenpunkts vom zweiten Brennpunkte gleich der ersten Hauptbrennweite. Also:

$$\left.\begin{aligned} f_{\prime} k_{\prime} &= f_{\prime\prime} h_{\prime\prime} \\ f_{\prime} h_{\prime} &= f_{\prime\prime} k_{\prime\prime} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \alpha).$$

Daraus folgt, dass der Abstand der gleichnamigen Haupt- und Knotenpunkte von einander gleich dem Unterschiede der beiden Brennweiten sei:

$$k_{\prime} h_{\prime} = k_{\prime\prime} h_{\prime\prime} = f_{\prime\prime} h_{\prime\prime} - f_{\prime} h_{\prime} \quad \} \quad \ldots\ldots \quad \beta)$$

und dass ausserdem der Abstand der beiden Hauptpunkte von einander gleich sei dem Abstande der beiden Knotenpunkte von einander:

$$h_{\prime} h_{\prime\prime} = k_{\prime} k_{\prime\prime} \quad \} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \gamma).$$

Endlich verhalten sich die beiden Hauptbrennweiten zu einander wie die Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mittels:

$$\frac{f_{\prime} h_{\prime}}{n_{\prime}} = \frac{f_{\prime\prime} h_{\prime\prime}}{n_{\prime\prime}} \quad \} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \delta).$$

Ist also das letzte Mittel dem ersten gleichartig und $n_{\prime} = n_{\prime\prime}$, wie es bei den meisten optischen Instrumenten, nicht aber beim Auge der Fall ist, so sind die beiden Hauptbrennweiten gleich, und es fallen die gleichnamigen Hauptpunkte und Knotenpunkte zusammen, nach Gleichung β).

Die ersten Brenn-, Haupt- und Knotenpunkte beziehen sich nach den gegebenen Definitionen stets auf den Gang der Strahlen im ersten Medium, die zweiten auf den Gang im letzten Medium.

Legt man senkrecht zur Axe Ebenen durch die beiden Brennpunkte, so heissen diese Brennebenen. Lichtstrahlen, welche von einem Punkte der ersten Brennebene ausgegangen sind, sind nach der Brechung unter einander parallel, und da nach der Definition der Knotenpunkte der vom leuchtenden Punkte nach dem ersten Knotenpunkte gerichtete Strahl nach der Brechung seiner ursprünglichen Richtung parallel sein soll, so müssen alle Strahlen, die von einem leuchtenden Punkte in der ersten Brennebene ausgegangen sind, jenem Strahle nach der Brechung parallel sein.

Strahlen, welche im ersten Mittel unter einander parallel sind, vereinigen sich in einem Punkte der zweiten Brennebene, und da derjenige von den parallelen Strahlen, welcher durch den ersten Knotenpunkt geht, nach der Brechung vom zweiten Knotenpunkte aus seiner früheren Richtung parallel weiter geht, so muss der Vereinigungspunkt der parallelen Strahlen da liegen, wo dieser letztere Strahl die zweite Brennebene schneidet.

Diese Regeln genügen, um in jedem Falle, wenn der Weg eines Strahls im ersten Medium gegeben ist, seinen Weg nach der letzten Brechung zu finden, und wenn ein leuchtender Punkt im ersten Medium gegeben ist, den Ort seines Bildes nach der letzten Brechung zu finden.

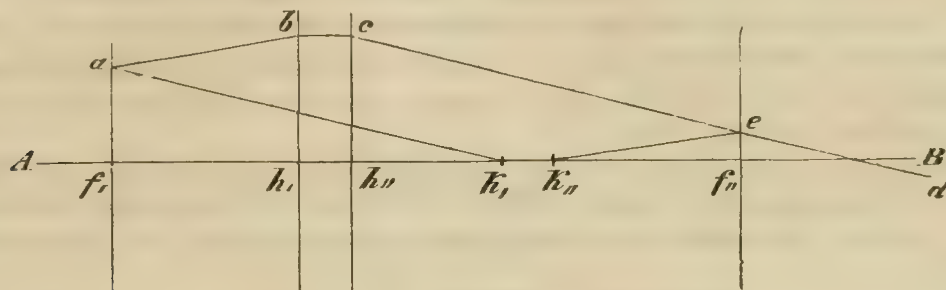


Fig. 24.

Es sei $a\,b$ der Weg eines Strahls im ersten Medium; man soll seinen Weg im letzten Medium finden.

Es sei a der Punkt, wo er die erste Brennebene schneidet, b der Punkt, wo er die erste Hauptebene schneidet, wobei im Allgemeinen die beiden Punkte a und b nicht in einer Ebene mit der Axe des Systems $A\ B$ liegen werden. Das Bild des Punktes b liegt in der zweiten Hauptebene, da die eine Hauptebene das Bild der anderen ist; und da ferner in diesem Falle das eine Bild dem anderen gleich und gleich gerichtet sein soll, so liegt das Bild des Punktes b der ersten Hauptebene in c, dem Fusspunkte des von b auf die zweite Hauptebene gefällten Lothes $b\,c$. Jeder Lichtstrahl, der von b ausgeht, oder durch b hindurchgeht, muss also nach der Brechung durch c gehen, als dem Bilde von b. So auch die Fortsetzung des Strahls $a\,b$.

Zweitens geht der Strahl $a\,b$ durch den Punkt a der ersten Brennebene. Jeder Strahl, welcher von einem Punkte der ersten Brennebene ausgeht, ist nach den oben hingestellten Regeln nach der Brechung parallel dem Strahle; welcher von jenem Punkte a nach dem ersten Knotenpunkte geht. Also muss der Strahl $a\,b$ nach der Brechung durch c gehen und parallel $a\,k_{\prime}$ sein. Man ziehe $c\,d$ parallel $a\,k_{\prime}$, so ist $c\,d$ der gebrochene Strahl.

Nach dem, was ich vorher über die Eigenschaft der zweiten Brennebene gesagt habe, können wir auch so verfahren. Man fälle das Loth $b\,c$ auf die zweite Hauptebene, ziehe $k_{\prime\prime}\,e$ parallel $a\,b$, welches in e die zweite Brennebene schneidet, so ist $c\,e$ der gebrochene Strahl. Dass dieser mit $c\,d$ zusammenfällt, lässt sich leicht zeigen.

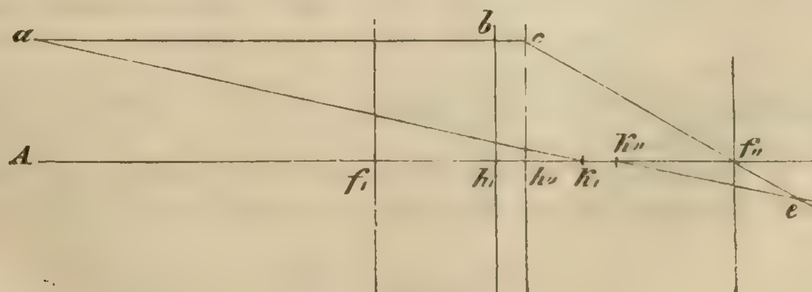


Fig. 25.

Es sei a ein leuchtender Punkt; es soll sein Bild gefunden werden.

Man braucht nur zwei Strahlen von a aus nach der ersten Hauptebene zu ziehen, und deren Weg nach der Brechung zu construiren. Wo sie sich schneiden, liegt das Bild von a. Wenn a ausserhalb der Axe liegt, ist es am bequemsten, den mit der Axe parallelen Strahl $a\,c$ und den nach dem ersten Knotenpunkte gehenden $a\,k_{\prime}$ zu benutzen. Wenn c der Punkt ist, wo der erstere Strahl die zweite Hauptebene schneidet, so ziehe man $c\,f_{\prime\prime}$ und verlängere es rückwärts oder vorwärts hinreichend, bis es die durch $k_{\prime\prime}$ mit $a\,k_{\prime}$ gelegte Parallele in e schneidet. Der Ort des Bildes ist e.

Dass der Strahl $a\,c$ nach der Brechung längs $c\,e$ und $a\,k_{\prime}$ längs $k_{\prime\prime}\,e$ geht, ergiebt sich leicht aus der vorigen Aufgabe und den obigen Definitionen.

Liegt der Punkt a in der Axe, so geht einer seiner Strahlen in der Axe selbst ungebrochen fort. Man braucht dann nur irgend einen anderen Strahl zu construiren, der ausserhalb der Axe verläuft. Wo letzterer nach der Brechung die Axe wieder schneidet, ist der Ort des Bildes.

Nachdem ich so die Resultate der mathematischen Untersuchung für diejenigen meiner Leser vorausgeschickt habe, denen es nur auf die Kenntniss der Resultate ankommt, lasse ich die vollständige mathematische Entwickelung derselben hier folgen.

Brechung an einer Kugelfläche.

Es sei a der Mittelpunkt der Kugelfläche $c\,b$, und p ein ausserhalb der Kugel liegender leuchtender Punkt. Ein von p ausgehender Lichtstrahl, welcher in der geraden Linie $p\,a$ auf den Mittelpunkt der Kugel zugeht, trifft die Kugelfläche normal, und geht deshalb ungebrochen weiter in der Verlängerung von $a\,p$ nach q hin. Ein anderer Lichtstrahl $p\,c$ treffe die Kugelfläche in c und werde hier gebrochen. Unsere nächste Aufgabe ist, seinen Weg nach der Brechung zu bestimmen.

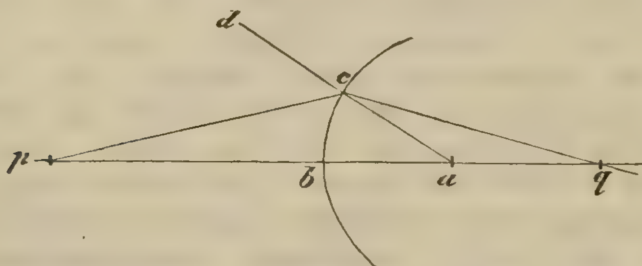


Fig. 26.

Nach dem oben angeführten Brechungsgesetze muss derselbe zunächst in der Einfallsebene bleiben, d. h. in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth gelegten Ebene. Da der Radius stets auf demjenigen Theile der Kugelfläche, zu welchem er hingeht, senkrecht steht, so ist in diesem Falle das Einfallsloth $c\,d$ die Verlängerung des Radius $a\,c$, und die Einfallsebene die durch $p\,c$ und $a\,d$ gelegte. In derselben liegt auch die ganze Linie $p\,q$, da zwei ihrer Punkte p und a darin liegen. Der gebrochene Strahl muss also die Linie $p\,a$, wenn sie nach beiden Seiten in das Unendliche verlängert gedacht wird, in irgend einem Punkte q schneiden, dessen Entfernung von b zunächst bestimmt werden soll. Sollte der Strahl der Linie $p\,a$ parallel sein, so können wir den Durchschnittspunkt q als unendlich entfernt betrachten.

Die Lage des Punktes q wird nun durch die Bedingung gegeben, dass

$$n_{\prime} \sin(pcd) = n_{\prime\prime} \sin(qca) \quad \S \quad \ldots\ldots \quad 1),$$

wo $n_{\prime}$ das Brechungsverhältniss des Mediums ist, aus welchem das Licht kommt, $n_{\prime\prime}$ desjenigen, in welches es eintritt.

Da sich in geradlinigen Dreiecken die Sinus der Winkel wie die gegenüberliegenden Seiten verhalten, ist in dem Dreiecke $a\,p\,c$

$$\frac{\sin(pca)}{\sin(cpa)} = \frac{ap}{ac}$$

und in dem Dreiecke $a\,q\,c$

$$\frac{\sin(qca)}{\sin(cqa)} = \frac{aq}{ac}.$$

Wenn wir die erste dieser Gleichungen durch die zweite dividiren, und dabei bemerken, dass der Sinus des Winkels $p\,c\,a$ gleich dem seines Nebenwinkels $p\,c\,d$ ist, so erhalten wir

$$\frac{\sin(pcd)}{\sin(qca)} \cdot \frac{\sin(cqa)}{\sin(cpa)} = \frac{ap}{aq}.$$

Nach Gleichung 1) ist

$$\frac{\sin(pcd)}{\sin(qca)} = \frac{n_{\prime\prime}}{n_\prime}$$

und in dem Dreieck $p\,c\,q$ ist

$$\frac{\sin(cqa)}{\sin(cpa)} = \frac{cp}{cq}.$$

Die drei letzten Gleichungen geben daher

$$\frac{n_{\prime\prime} \cdot cp}{n_\prime \cdot cq} = \frac{ap}{aq} \quad \ldots\ldots \quad 2).$$

Für $ap = \infty$ wird daraus

$$n_\prime \cdot cq = n_{\prime\prime} \cdot aq \quad \ldots\ldots \quad 2a),$$

da alsdann bis auf unendlich kleine Grössen

$$\frac{cp}{ap} = 1.$$

Man kann die Gleichung 2) leicht benutzen, um den Gang der Lichtstrahlen durch Construction zu finden, wobei man denn, da im Allgemeinen der Punkt q seine Lage ändert, wenn dem Punkte c eine andere Lage gegeben wird, findet, dass die Lichtstrahlen sich nicht genau in einem Punkte, sondern in einer krummen Linie (kaustischen Linie) schneiden, von der Art, wie sie in *Fig 27* für parallel auffallende Strahlen dargestellt ist. $B\,B$ ist hier die brechende Kugelfläche, C sind die einfallenden Strahlen, $G\,F\,G$ die kaustische Linie, welche durch die Durchschnittspunkte je zweier zunächst auf einander folgender gebrochener Strahlen gebildet wird. Die mittelsten Strahlen vereinigen sich in der Spitze dieser Linie bei F.

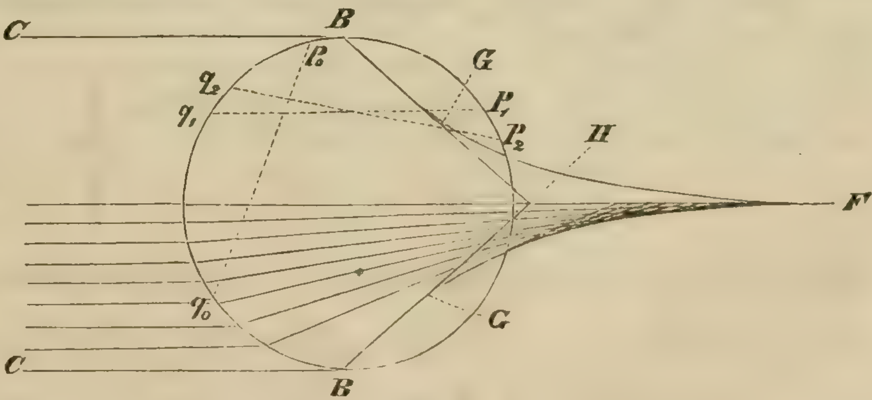


Fig. 27.

Wenn wir uns auf diejenigen Strahlen beschränken, welche nahe senkrecht auf die brechende Fläche, also sehr nahe der Axe auf sie fallen, so sehen wir aus der *Fig. 26*, dass, wenn der Punkt c sehr nahe an b rückt, das Verhältniss $\frac{cp}{cq}$ übergeht in $\frac{bp}{bq}$. Die Gleichung 2) wird dann also

$$\frac{n_{\prime\prime} \cdot bp}{n_\prime \cdot bq} = \frac{ap}{aq} \quad \ldots\ldots \quad 2b).$$

Bezeichnen wir den Radius $a\,b$ der brechenden Fläche mit r, die Entfernung

$b\,p$ mit $f_{\prime}$,
$b\,q$ mit $f_{\prime\prime}$,
$a\,p$ mit $g_{\prime}$,
$a\,q$ mit $g_{\prime\prime}$,

so dass also

$$\left.\begin{array}{l} f_{\prime} + r = g_{\prime} \\ f_{\prime\prime} = g_{\prime\prime} + r \end{array}\right\} \qquad 2c),$$

so wird die Gleichung 2b)

$$\frac{n_{\prime\prime} f_{\prime}}{n_{\prime} f_{\prime}} = \frac{f_{\prime} + r}{f_{\prime\prime} - r} \quad \text{oder}$$

$$\frac{n_{\prime\prime}(g_{\prime} - r)}{n_{\prime}(g_{\prime\prime} + r)} = \frac{g_{\prime}}{g_{\prime\prime}}.$$

Daraus erhält man durch eine leichte Umformung:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{n_{\prime}}{f_{\prime}} + \dfrac{n_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime}} = \dfrac{n_{\prime\prime} - n_{\prime}}{r} \quad \text{oder} \\ \dfrac{n_{\prime\prime}}{g_{\prime}} + \dfrac{n_{\prime}}{g_{\prime\prime}} = \dfrac{n_{\prime\prime} - n_{\prime}}{r} \end{array}\right\} \qquad 3),$$

aus denen die gesuchte Grösse $f_{\prime\prime}$ oder $g_{\prime\prime}$ zu bestimmen ist.

Nennen wir die Werthe von $f_{\prime\prime}$ und $g_{\prime\prime}$, welche einer unendlichen Entfernung des leuchtenden Punkts entsprechen, beziehlich $F_{\prime\prime}$ und $G_{\prime\prime}$, so erhalten wir, da $f_{\prime} = \infty$ und $g_{\prime} = \infty$

$$\left.\begin{array}{l} F_{\prime\prime} = \dfrac{n_{\prime\prime}\, r}{n_{\prime\prime} - n_{\prime}} \\ G_{\prime\prime} = \dfrac{n_{\prime}\, r}{n_{\prime\prime} - n_{\prime}} \end{array}\right\} \qquad 3a).$$

Setzen wir $f_{\prime\prime}$ und $g_{\prime\prime}$ unendlich gross, und bezeichnen für diesen Fall $f_{\prime}$ und $g_{\prime}$ mit $F_{\prime}$ und $G_{\prime}$, so ist

$$\left.\begin{array}{l} F_{\prime} = \dfrac{n_{\prime}\, r}{n_{\prime\prime} - n_{\prime}} = G_{\prime\prime} \\ G_{\prime} = \dfrac{n_{\prime\prime}\, r}{n_{\prime\prime} - n_{\prime}} = F_{\prime\prime} \end{array}\right\} \qquad 3b)$$

und nun können wir den Gleichungen 3) die einfache Form geben

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{F_{\prime}}{f_{\prime}} + \dfrac{F_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime}} = 1 \\ \dfrac{G_{\prime}}{g_{\prime}} + \dfrac{G_{\prime\prime}}{g_{\prime\prime}} = 1 \end{array}\right\} \qquad 3c).$$

Die erste dieser Gleichungen giebt, nach $f_{\prime}$ und nach $f_{\prime\prime}$ aufgelöst, folgende Formeln zur Berechnung dieser Grössen

$$\left.\begin{array}{l} f_{\prime} = \dfrac{F_{\prime}\, f_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime} - F_{\prime\prime}} \\ f_{\prime\prime} = \dfrac{F_{\prime\prime}\, f_{\prime}}{f_{\prime} - F_{\prime}} \end{array}\right\} \qquad 3d).$$

Findet man negative Werthe dieser Grössen, so bedeutet es, dass sie auf der entgegengesetzten Seite der brechenden Fläche liegen, als in *Fig. 26* angenommen ist.

Bemerkungen. 1) Wenn das Licht nicht von p im ersten Medium, sondern von q im zweiten ausgeht, wird für den Strahl $c\,q$ *Fig. 26*, der vorher der gebrochene Strahl, jetzt der einfallende ist, $c\,p$ der zugehörige gebrochene sein, welcher vorher der einfallende war. Sind also die nahe senkrecht von p auf die brechende Fläche fallenden Strahlen in q vereinigt, so werden die von q nahe senkrecht auffallenden in p vereinigt werden. Daraus ergeben sich nun sogleich die Formeln für den Fall, dass die Lichtstrahlen auf die concave Seite der Kugelfläche fallen. Man braucht nur das erste Medium jetzt das zweite zu nennen und umgekehrt, und dem entsprechend alle Indices der Buchstaben zu vertauschen. Die Grundgleichungen 3) werden alsdann

$$\frac{n_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime}} + \frac{n_{\prime}}{f_{\prime}} = \frac{n_{\prime} - n_{\prime\prime}}{r}$$

$$\frac{n_{\prime}}{g_{\prime\prime}} + \frac{n_{\prime\prime}}{g_{\prime}} = \frac{n_{\prime} - n_{\prime\prime}}{r}.$$

Man braucht also für eine concave brechende Fläche nur den Krümmungsradius r negativ zu setzen, so gilt auch für sie die Formel 3), und natürlich gelten eben so auch die daraus abgeleiteten 3 a), 3 b), 3 c) und 3 d).

2) Wenn q das Bild von p ist, ist auch p das Bild von q. Um diese gemeinsame Beziehung auszudrücken, nennt man sie conjugirte Vereinigungspunkte, wobei man es zweifelhaft lässt, von welchem beider Punkte das Licht ausgeht. Eben so ist es für die Brechungsgesetze einerlei, ob der Licht aussendende Punkt ein materieller, Licht erzeugender oder auffallendes Licht zerstreuender Punkt sei, oder nur der Vereinigungspunkt von gebrochenen Strahlen. Daher kann der leuchtende Punkt auch ein virtueller Vereinigungspunkt solcher Strahlen sein, und in der Verlängerung der Strahlen hinter der brechenden Fläche liegen.

3) Ich bemerke noch, dass auch die Gesetze der Reflexion der Strahlen an gekrümmten Spiegeln aus den gegebenen Formeln 3) hervorgehen, wenn man $n_{\prime\prime} = -n_{\prime}$ setzt. Wir werden dergleichen Formeln für die Spiegelbilder, welche die brechenden Flächen im Auge geben, zuweilen brauchen. Gewöhnlich zieht man es jedoch vor, für solche Spiegel die Bezeichnung anders zu wählen. Setzen wir in der ersten Gleichung 3) statt $n_{\prime\prime}$ überall $-n_{\prime}$, so erhalten wir

$$\frac{1}{f_{\prime}} - \frac{1}{f_{\prime\prime}} = -\frac{2}{r}.$$

Ist r nach unserer bisherigen Bezeichnung positiv, d. h. der Spiegel convex, so würde für $f_{\prime} = \infty$ der Werth von $f_{\prime\prime}$ werden gleich $\frac{r}{2}$, also positiv, d. h. der Vereinigungspunkt der Strahlen liegt hinter der spiegelnden Fläche, ist nur virtuell. Wäre der Spiegel concav, r also negativ, so wird auch $f_{\prime\prime}$ negativ, das Bild des leuchtenden Punktes liegt vor dem Spiegel und ist reell. Gewöhnlich zieht man vor, die Entfernungen der reellen Bilder vom Spiegel positiv zu nennen. Man giebt also dem $f_{\prime\prime}$ und dem Radius der spiegelnden Fläche r entgegengesetzte Vorzeichen als bei brechenden Flächen, und schreibt demnach die Grundgleichung

$$\frac{1}{f_{\prime}} + \frac{1}{f_{\prime\prime}} = \frac{2}{r}.$$

4) Wenn r unendlich gross, d. h. die brechende Fläche eben wird, so werden nach 3 a) auch die Brennweiten unendlich gross, und die erste der Gleichungen 3) verwandelt sich in

$$\frac{n_{\prime}}{f_{\prime}} + \frac{n_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime}} = 0$$

oder

$$f_{\prime\prime} = -\frac{n_{\prime\prime}}{n_{\prime}} f_{\prime} \quad \Big\} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3\text{ e}).$$

Das Bild liegt also auf derselben Seite von der brechenden Fläche, aber in einer anderen Entfernung.

Abbildung von Objecten durch eine brechende Kugelfläche.

Wenn im Folgenden die Rede von Objecten ist, deren Bilder durch gekrümmte brechende Flächen entworfen werden, so sind darunter stets ebene Objecte verstanden, deren Fläche senkrecht steht gegen die Axe des optischen Systems, und von denen nur solche Lichtstrahlen ausgehen, die erstens nahe senkrecht auf die brechenden Flächen fallen, und zweitens mit der Axe sehr kleine Winkel einschliessen.

Wenn eine kugelige brechende Fläche von einem leuchtenden Punkte ein Bild entwirft, so können wir die Verbindungslinie dieses Punktes mit dem Mittelpunkte als Axe betrachten. Wenn ein Object von der beschriebenen Art da ist, müssen wir das von dem Mittelpunkte auf die Ebene des Objects gefällte Loth als die Axe betrachten.

Es sei in *Fig. 28* $p\,r$ die Axe, $s\,p$ senkrecht zu $p\,r$ ein Durchschnitt der Ebene des Objects, s ein leuchtender, seitlich neben der Axe liegender Punkt, a der Mittelpunkt der brechenden Fläche, t das Bild von s. Es soll die Lage von t bestimmt werden durch zwei rechtwinkelige Coordinaten $r\,a$ und $r\,t$, jenes parallel, dieses senkrecht zur Axe.

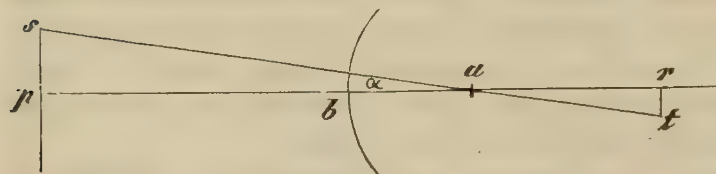


Fig. 28.

Abstrahiren wir zunächst von p, r und den übrigen vorhandenen leuchtenden Punkten des Objects $s\,p$, so muss das Bild von s, wie aus der bisherigen Untersuchung hervorgeht, zunächst in der Verlängerung der Verbindungslinie von s und a liegen, so dass also $s\,a$ und $a\,t$ eine gerade Linie bilden.

Bezeichnen wir $s\,a$ mit $\gamma_{\prime}$ und $a\,t$ mit $\gamma_{\prime\prime}$, so ist nach Gleichung 3 c)

$$\frac{G_{\prime}}{\gamma_{\prime}} + \frac{G_{\prime\prime}}{\gamma_{\prime\prime}} = 1 \quad \Big\} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 4).$$

Bezeichnen wir ferner $p\,a$ mit $g_{\prime}$, $a\,r$ mit x und den Winkel $s\,a\,p$ mit α, so ist

$$\gamma_{\prime} = \frac{g_{\prime}}{\cos\alpha}$$

$$\gamma_{\prime\prime} = \frac{x}{\cos\alpha}.$$

Die Werthe von $\gamma_{\prime}$ und $\gamma_{\prime\prime}$ in die Gleichung 4) gesetzt ergeben:

$$\frac{G_{\prime}}{g_{\prime}} = \frac{G_{\prime\prime}}{x} = \frac{1}{\cos\alpha}.$$

Da nach der vorangeschickten Voraussetzung über die Grösse der abzubildenden Objecte der Winkel α sehr klein sein soll, so unterscheidet sich $\cos\alpha$ von 1 nur um ein Kleines zweiter Ordnung, und kann daher annähernd $= 1$ gesetzt werden. Dann erhalten wir

$$\frac{G_{\prime}}{g_{\prime}} + \frac{G_{\prime\prime}}{x} = 1.$$

Ist $g_{\prime\prime}$ die Entfernung des Bildes von p von a, so ist

$$\frac{G_{\prime}}{g_{\prime}} + \frac{G_{\prime\prime}}{g_{\prime\prime}} = 1,$$

also

$$x = g_{\prime\prime} \quad \Big\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 5).$$

Der Fusspunkt des Lothes tr ist also das Bild von p.

Die Bilder der Punkte, welche in einer durch p gegen die Axe senkrecht gelegten Ebene liegen, liegen also auch annähernd in einer gegen die Axe senkrechten Ebene, welche durch das Bild von p gelegt ist.

Hat man also zuerst das Bild r von p gesucht, und durch r eine gegen die Axe senkrechte Ebene gelegt, so findet man die Orte der Bilder aller einzelnen Punkte des leuchtenden Objects leicht, indem man durch den betreffenden Punkt des Objects und den Mittelpunkt der brechenden Kugelfläche eine gerade Linie legt; wo diese die durch r gelegte Ebene schneidet, ist der Ort des Bildes.

Aus dieser Construction folgt nach bekannten geometrischen Sätzen, dass das Bild dem Objecte geometrisch ähnlich ist.

Daraus ergiebt sich ferner leicht das Verhältniss der entsprechenden Lineardimensionen des Objects zu denen des Bildes. Nennen wir z. B. sp als eine solche Dimension des Objects $\beta_{\prime}$, und tr als die zugehörige des Bildes $-\beta_{\prime\prime}$ (negativ, weil sie an der entgegengesetzen Seite der Axe liegt), so ist:

$$-\frac{\beta_{\prime}}{\beta_{\prime\prime}} = \frac{g_{\prime}}{g_{\prime\prime}} \quad \Big\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

oder in Verbindung mit 2 c), 3 a), 3 b) und 3 c)

$$\frac{\beta_{\prime\prime}}{\beta_{\prime}} = \frac{G_{\prime\prime}}{G_{\prime} - g_{\prime}} = \frac{G_{\prime\prime} - g_{\prime\prime}}{G_{\prime}} \quad \Big\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6\,a)$$

oder

$$\frac{\beta_{\prime\prime}}{\beta_{\prime}} = \frac{F_{\prime}}{F_{\prime} - f_{\prime}} = \frac{F_{\prime\prime} - f_{\prime\prime}}{F_{\prime\prime}} \quad \Big\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6\,b).$$

Wenn die brechende Fläche eben ist, werden die Brennweiten unendlich gross, und die Gleichung 6 b) verwandelt sich in

$$\frac{\beta_{\prime\prime}}{\beta_{\prime}} = 1 \quad \Big\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 6\,c).$$

Das Bild, welches eine ebene brechende Fläche entwirft, ist also so gross wie sein Object.

Verallgemeinerung der bisher gewonnenen Formeln. Wir wollen zunächst die oben definirten Begriffe der Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte auf unseren Fall anwenden.

Die Brennpunkte sind diejenigen, in denen sich Strahlen vereinigen, die im ersten oder zweiten Mittel parallel der Axe verlaufen. Die Entfernungen der beiden Brennpunkte $F_{\prime}$ und $F_{\prime\prime}$ von dem Scheitel der brechenden Fläche, und $G_{\prime}$ und $G_{\prime\prime}$

von deren Mittelpunkte sind schon oben in den Gleichungen 3 a) und 3 b) gefunden, und dadurch ist die Lage der Brennpunkte bestimmt.

Die Brennebenen sind senkrecht durch die Brennpunkte gelegte Ebenen. Da das Bild jedes Brennpunktes in unendlicher Entfernung liegt, so muss dasselbe auch für solche Punkte der Brennebenen der Fall sein, welche der Axe nahe genug sind, um regelmässige Bilder geben zu können. Strahlen, die von einem Punkte einer Brennebene ausgehen, werden also nach der Brechung parallel sein.

Die Hauptpunkte und die durch sie senkrecht zur Axe gelegten Hauptebenen sind dadurch charakterisirt, dass Bilder in den Hauptebenen liegend gleich gerichtet und gleich gross seien. Für die Hauptebenen muss also $\beta_{,} = \beta_{,,}$ sein. Das kann nach den Gleichungen 6 b) nur der Fall sein, wenn $f_{,} = 0$ und $f_{,,} = 0$, was laut der Gleichungen 3 d) stets gleichzeitig der Fall sein muss. Beide Hauptpunkte fallen also in unserem Falle zusammen in den Punkt, wo die Axe die brechende Fläche schneidet, und dieser Hauptpunkt ist sein eigenes Bild.

Die Knotenpunkte sind dadurch definirt, dass jeder Strahl, der vor der Brechung durch den ersten geht, nach der Brechung durch den zweiten geht, und dabei seiner ersten Richtung parallel bleibt. Auch diese beiden fallen in einen Punkt, nämlich den Mittelpunkt der Kugel zusammen. Denn ein Strahl, der im ersten Mittel auf den Mittelpunkt der Kugel zugeht, geht ungebrochen durch die Fläche, geht also auch im zweiten Mittel durch den Mittelpunkt, und ist seiner früheren Richtung parallel.

Die Constructionen der Richtung der Strahlen, welche oben aus den Definitionen der genannten Ebenen und Punkte hergeleitet sind, lassen sich also auch auf eine einzelne brechende Fläche anwenden, und die Constructionen vereinfachen sich noch dadurch, dass erstens jeder Punkt in der ersten Hauptebene sein eigenes Bild ist, und man nicht erst den zugehörigen in der zweiten Hauptebene zu suchen hat, und zweitens dadurch, dass der nach dem ersten Knotenpunkte gehende Strahl unmittelbar in seiner eigenen Verlängerung weiter geht, und man nicht erst eine Parallele mit ihm durch den zweiten Knotenpunkt zu legen hat.

Wir haben unter 3 c) zwei Gleichungen ganz ähnlicher Form aufgestellt, bei denen aber die Entfernungen der Bilder von verschiedenen Punkten aus gemessen waren. Gleichungen von derselben einfachen Form erhalten wir immer, wenn wir die Entfernungen der Vereinigungspunkte, welche dem ersten Mittel angehören, von einem beliebigen Punkte s *Fig. 29* der Centrallinie ap an messen, und von dem Bilde t dieses Punktes aus die Entfernungen der Vereinigungspunkte, die dem zweiten Mittel angehören.

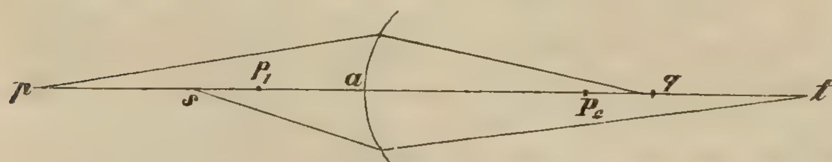


Fig. 29.

Ist also t das Bild von s, q das Bild von p, P_1 der erste, P_2 der zweite Hauptbrennpunkt, und bezeichnen wir

sa mit f_1,	$P_1 a$ mit F_1,
ta mit f_2,	$P_2 a$ mit F_2,
pa mit φ_1,	
qa mit φ_2,	
ps mit h_1,	qt mit $-h_2$,
$P_1 s$ mit $-H_1$.	qP_2 mit $-H_2$,

so ist

$$\alpha)\quad \frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} = 1$$

$$\beta)\quad \frac{F_1}{\varphi_1} + \frac{F_2}{\varphi_2} = 1$$

$$\gamma)\quad \varphi_1 - f_1 = h_1,$$

$$\delta)\quad \varphi_2 - f_2 = h_2,$$

$$\varepsilon)\quad F_1 - f_1 = H_1,$$

$$\zeta)\quad F_2 - f_2 = H_2.$$

Setzt man aus γ und δ die Werthe von φ_1 und φ_2 in β, so erhält man

$$\frac{F_1}{h_1 + f_1} + \frac{F_2}{h_2 + f_2} = 1 \quad \text{oder}$$

$$F_1 (h_2 + f_2) + F_2 (h_1 + f_1) = (h_1 + f_1)(h_2 + f_2).$$

Subtrahirt man hiervon die aus α abzuleitende Gleichung

$$F_1 f_2 + F_2 f_1 = f_1 f_2,$$

so erhält man als Rest

$$F_1 h_2 + F_2 h_1 = h_1 h_2 + h_1 f_2 + h_2 f_1 \quad \text{oder}$$

$$(F_1 - f_1) h_2 + (F_2 - f_2) h_1 = h_1 h_2,$$

was vermöge der Gleichungen ε und ζ sich verwandelt in

$$H_1 h_2 + H_2 h_1 = h_1 h_2 \quad \text{oder}$$

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_2} = 1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 7).$$

Wenn man also als Ausgangspunkte für die Messung der Abstände irgend ein Paar zusammengehöriger Vereinigungspunkte von Lichtstrahlen benutzt, kommt man immer wieder zu derselben einfachen Formel zurück. Da in der brechenden Fläche selbst und in ihrem Mittelpunkte der leuchtende Punkt mit seinem Gegenstande zusammenfällt, sind diese beiden Punkte ihre eigenen Bilder, und die Formeln 3 c) bilden deshalb nur specielle Fälle von 7).

Wenn man den Punkt s in den ersten Brennpunkt verlegt, wird die Gleichung 7) unbrauchbar, weil H_2 und h_2 unendlich gross werden. Man findet aber die entsprechende Gleichung leicht aus der ersten der Gleichungen 3 d)

$$f_{\prime} = \frac{F_{\prime} f_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime} - F_{\prime\prime}}.$$

Zieht man von beiden Seiten $F_{\prime}$ ab, so erhält man

$$f_{\prime} - F_{\prime} = \frac{F_{\prime} F_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime} - F_{\prime\prime}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7\text{a}).$$

Setzen wir hier $f_{\prime} - F_{\prime} = l_{\prime}$, und $f_{\prime\prime} - F_{\prime\prime} = l_{\prime\prime}$, wobei $l_{\prime}$ die Entfernung des leuchtenden Punktes vom ersten Brennpunkte aus nach vorn gerechnet, $l_{\prime\prime}$ die Entfernung seines Bildes vom zweiten Brennpunkte aus nach hinten sein würde, so erhalten wir die einfachste Form, in der sich das Gesetz für die Lage der Bilder darstellen lässt:

$$l_{\prime} l_{\prime\prime} = F_{\prime} F_{\prime\prime} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 7\text{b})$$

In derselben Bezeichnungsweise wird das Gesetz für die Grösse der Bilder, die Gleichung 6 b)

$$\left.\begin{array}{l}\frac{\beta_{\prime}}{\beta_{\prime\prime}} = -\frac{l_{\prime}}{F_{\prime}} \text{ oder} \\ \frac{\beta_{\prime\prime}}{\beta_{\prime}} = -\frac{l_{\prime\prime}}{F_{\prime\prime}}\end{array}\right\} \quad \text{7 c).}$$

Beziehung zwischen der Grösse der Bilder und Convergenz der Strahlen.

Es sei in *Fig. 30* pq die Axe, sp ein Object und qr sein Bild. Wir wollen die Winkel α_1 und α_2 bestimmen, welche einer der von p ausgehenden Strahlen pc vor und nach der Brechung mit der Axe macht, und diese Winkel positiv rechnen, wenn der Strahl sich in Richtung der als positiv gerechneten Bilder von der Axe entfernt. Es ist also $\angle cpa = \alpha_1$, $\angle cqa = -\alpha_2$. Es sei ferner, wie bisher, $sp = \beta_1$, $qr = -\beta_2$, $ap = f_1$, $aq = f_2$. Da die Einfallswinkel der Strahlen an der brechenden Fläche immer sehr klein bleiben sollen, muss ca ein sehr kleiner Bogen sein, den wir annähernd als eine gegen die Axe senkrechte gerade Linie betrachten können. Wir können also setzen

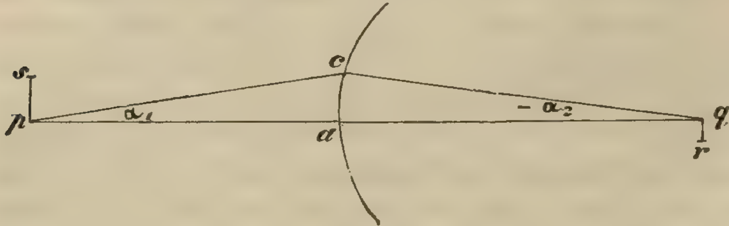


Fig. 30.

$$ac = f_1 \, tg\, \alpha_1,$$

$$ac = -f_2 \, tg\, \alpha_2, \text{ also}$$

$$f_1 \, tg\, \alpha_1 = -f_2 \, tg\, \alpha_2 \quad \text{A.}$$

Wir haben ferner nach 3 d) und 6 b)

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{F_2}{f_1 - F_1} = \frac{f_2 - F_2}{F_1},$$

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{F_1}{F_1 - f_1} = \frac{F_2 - f_2}{F_2}$$

und $\frac{F_2}{F_1} = \frac{n_2}{n_1}$ nach 3 a) und 3 b). Daraus folgt:

$$\frac{f_2}{f_1} = -\frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_1}.$$

Dies in die Gleichung A gesetzt, giebt

$$n_1 \beta_1 \, tg\, \alpha_1 = n_2 \beta_2 \, tg\, \alpha_2 \quad \text{7 d).}$$

Diese Gleichung spricht ein wichtiges Gesetz aus, welches die Grösse der Bilder mit der Divergenz der Strahlen verknüpft, unabhängig von der Entfernung und der Brennweite der brechenden Fläche.

Brechung in Systemen von Kugelflächen.

Wir wollen jetzt die Gesetze der Brechung in centrirten optischen Systemen untersuchen, d. h. solchen, welche eine Reihe von brechenden Kugelflächen enthalten, deren Mittelpunkte alle in einer geraden Linie, der optischen Axe des Systems, liegen.

Vorn nennen wir in Bezug auf das System die Seite, von der das Licht herkommt, hinten die, wo es hingeht. Die brechende Fläche, welche das Licht zuerst trifft, ist die erste, das Medium, welches vor der ersten brechenden Fläche gelegen ist, das erste, das zwischen der ersten und zweiten gelegene das zweite, das hinter der letzten, das letzte. Wenn wir m brechende Flächen haben, so haben wir $m + 1$ brechende Medien. Es sei n_1 das Brechungsverhältniss des ersten, n_2 des zweiten, n_{m+1} des letzten brechenden Mittels. Wie bisher nehmen wir die Radien der brechenden Flächen positiv, wenn deren Convexität nach vorn, negativ, wenn sie nach hinten sieht. Auch bemerke ich hier gleich ein für alle Mal, dass, wenn von einem Strahlencentrum oder Bilde gesprochen wird, welches in einem gewissen brechenden Mittel liege, oder diesem angehöre, darunter auch stets der Fall mitverstanden ist, wo das Bild potentiell ist, und erst durch Verlängerung der Strahlen über die Grenzen des Mittels hinaus entstehen würde.

Zunächst wissen wir aus der bisherigen Untersuchung, dass homocentrische Strahlen, welche unter kleinen Einfallswinkeln auf kugelige brechende Flächen fallen, homocentrisch bleiben. Daraus folgt, dass homocentrische Strahlen, welche unter kleinen Winkeln gegen die Axe in das optische System eintreten, nach jeder Brechung homocentrisch bleiben, und eben so aus der letzten brechenden Fläche wieder heraustreten. Wenn das einfallende Licht einer Anzahl von Vereinigungspunkten angehört, welche alle in einer auf der optischen Axe senkrechten Ebene liegen, so wissen wir ferner, dass nach der ersten Brechung die Vereinigungspunkte wieder alle in einer auf der optischen Axe senkrechten Ebene liegen, und ihre Vertheilung der früheren geometrisch ähnlich ist. So wird es daher auch nach jeder folgenden Brechung sein, und auch das letzte Bild wird dem ursprünglichen geometrisch ähnlich sein, und wie dieses in einer auf die optische Axe senkrechten Linie liegen.

Indem man nun das Bild, welches von der ersten brechenden Fläche entworfen ist, als den Gegenstand für die zweite betrachtet, das Bild der zweiten als den Gegenstand der dritten u. s. w., kann man ohne besondere Schwierigkeit schliesslich Grösse und Lage des letzten Bildes berechnen. Allerdings werden aber die Formeln schon bei einer mässigen Zahl brechender Flächen bald sehr weitläufig.

Hier kommt es uns nur darauf an, einige allgemeine Gesetze zu beweisen, welche für jede beliebige Zahl brechender Flächen gültig sind, was uns für das Auge desto wichtiger ist, da dieses in den verschiedenen Schichten der Krystallinse unendlich viele brechende Flächen enthält, die Rechnung auf dem angedeuteten Wege also doch nicht zu Ende zu führen sein würde.

1. Zuerst will ich zeigen, dass das in Gleichung 7) für eine Fläche ausgesprochene Gesetz auch für beliebig viele gilt.

Es sei in *Fig. 31* die mit 1 bezeichnete brechende Fläche die erste, die mit $(m-1$ bezeichnete die vorletzte, die mit m bezeichnete die letzte Fläche des

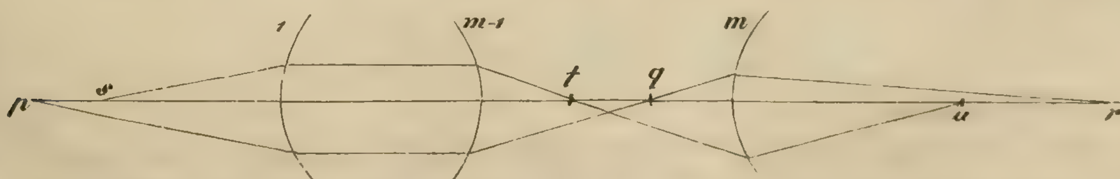


Fig. 31.

Systems. Wenn s der Vereinigungspunkt der eintretenden Strahlen ist, sei u der der ausgetretenen, wenn p der der eintretenden ist, sei r der der austretenden. Wir bezeichnen ps mit h_1, ur mit h_{m+1}, so will ich beweisen, dass

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_{m+1}} = 1,$$

wo H_1 der Abstand des ersten Hauptbrennpunktes von s, H_2 der des zweiten von u ist.

Um das Gesetz allgemein zu beweisen, werde ich zeigen, dass, wenn es für ein System von $(m-1)$ Flächen richtig ist, es auch für m Flächen gilt. Da es nun für eine Fläche bewiesen ist, folgt dann, dass es auch für zwei, und wenn für zwei, auch für drei u. s. w. *in infinitum* richtig sei.

Das System der $(m-1)$ ersten Flächen entwerfe von dem Punkte s das Bild t, und von dem Punkte p das Bild q, und tq werde bezeichnet mit h_m. Die Entfernungen der Hauptbrennpunkte des Systems der $(m-1)$ Flächen von den Punkten s und t seien beziehlich L_1 und L_2, die Entfernungen der Hauptbrennpunkte der letzten $m$ten Fläche von den Punkten t und u seien beziehlich M_1 und M_2, wobei alle diese Entfernungen immer von den Punkten s, t und u aus in der Richtung positiv gerechnet werden, in welcher das brechende Medium, dem die betreffenden Strahlenbündel angehören, von den betreffenden brechenden Flächen oder Systemen liegt. Nun haben wir nach der Voraussetzung

$$\frac{L_1}{h_1} + \frac{L_2}{h_m} = 1,$$

und für die Brechung in der letzten Fläche

$$-\frac{M_1}{h_m} + \frac{M_2}{h_{m+1}} = 1.$$

Wenn wir die erste dieser Gleichungen mit L_2, die zweite mit M_1 dividiren, und beide addiren, erhalten wir

$$\frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{1}{h_1} + \frac{M_2}{M_1} \frac{1}{h_{m+1}} = \frac{1}{L_2} + \frac{1}{M_1} \quad \text{oder}$$

$$\frac{M_1 L_1}{M_1 + L_2} \cdot \frac{1}{h_1} + \frac{M_2 L_2}{M_1 + L_2} \cdot \frac{1}{h_{m+1}} = 1.$$

Setzen wir $h_1 = \infty$, wobei $h_{m+1} = H_2$ werden muss, so ergiebt diese Gleichung

$$H_2 = \frac{M_2 L_2}{M_1 + L_2},$$

und setzen wir $h_{m+1} = \infty$, wobei $h_1 = H_1$ werden muss, so ergiebt sich

$$H_1 = \frac{H_1 L_1}{M_1 + L_2},$$

also schliesslich

$$\left.\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_{m+1}} = 1\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 8),$$

wie zu beweisen war.

Diese Gleichung liefert für jeden reellen Werth zwischen $+\infty$ und $-\infty$ von h_1 einen und nur einen von h_{m+1}, und eben so für jeden der letzteren Grösse einen und nur einen von h_1. Der erste wie der letzte Vereinigungspunkt können also an jeder Stelle der Axe liegen, und sobald der eine gegeben ist, ist auch die Lage des anderen eindeutig bestimmt.

2. Jedes optische System hat zwei und nur zwei zusammengehörige Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen, in denen die Grösse eines auf die Axe senkrechten ebenen Bildes der des zugehörigen Gegenstandes gleich wird. Wir nennen die

Ebene eines solchen Gegenstandes die erste und die des zugehörigen Bildes die zweite Hauptebene des Systems, und die beiden Punkte, wo sie die optische Axe schneiden, beziehlich den ersten und zweiten Hauptpunkt. Die zu den Hauptpunkten gehörigen Hauptbrennweiten sind den zugehörigen Brechungsverhältnissen des ersten und letzten Mittels proportional.

Es sei sp der abgebildete Gegenstand, p ein Punkt desselben in der Axe, s ein anderer seitlich davon. Wenn wir den Gegenstand längs der Axe verschieben,

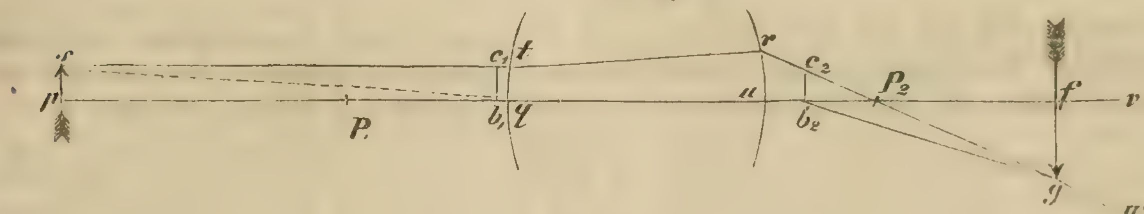


Fig. 32.

so dass er immer sich selbst parallel bleibt, so wird sich der Punkt s in der mit der Axe parallelen Linie st bewegen. Der Lichtstrahl st wird also stets dem Punkte s angehören, welches auch die Entfernung pq sein möge. Die der Axe parallelen Lichtstrahlen werden nun durch das brechende System so gebrochen, dass sie schliesslich durch den zweiten Hauptbrennpunkt P_2 gehen. Es sei rw der Gang des Lichtstrahls st nach der letzten Brechung. Da st stets dem leuchtenden Punkte s angehört, muss rw stets dem Bilde dieses Punktes angehören, d. h. das Bild von s muss in rw liegen. Es sei fg das Bild von sp, welches nach dem Vorausgeschickten senkrecht gegen die Axe uv sein muss. Wenn p sich längs der Axe verschiebt, wird sich auch f längs uv, und g längs rw verschieben, und es ist ersichtlich, dass die Grösse des Bildes fg sich hierbei proportional dem Abstande $P_2 f$ ändern muss, wie dasselbe für eine einfache brechende Fläche oben in den Gleichungen 6 a) und 6 b) ausgesprochen ist. Da ferner aus Gleichung 8) zu ersehen ist, dass die Entfernung $P_2 f$ jeden beliebigen Werth zwischen $+\infty$ und $-\infty$ annehmen kann, so wird auch die Grösse des Bildes, wenn wir die eines umgekehrten Bildes negativ bezeichnen, jeden zwischen diesen Grenzen liegenden Werth annehmen können, und einen jeden nur einmal annehmen können. Es wird also auch seinem Gegenstande sp an einer und nur an einer Stelle gleich werden müssen; es sei $c_1 b_1$ in diesem Falle der Gegenstand und $c_2 b_2$ das ihm gleiche Bild, so bezeichnen diese beiden Linien die Lage der sogenannten Hauptebenen des Systems.

Bezeichnen wir nun

$$sp = c_2 b_2 = \beta_1,$$
$$fg = -\beta_2,$$
$$b_1 P_1 = F_1, \qquad b_1 p = f_1,$$
$$b_2 P_2 = F_2, \qquad b_2 f = f_2.$$

so ist

$$\frac{c_2 b_2}{fg} = \frac{b_2 P_2}{P_2 f} \text{ oder}$$

$$-\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{F_2}{f_2 - F_2},$$

und da nach Gleichung 8)

$$\frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} = 1 \quad \Big\{ \quad \ldots \ldots \ldots \quad 8\text{a}).$$

so erhält man entsprechend der für eine brechende Fläche geltenden Gleichung 6 b)

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{F_2}{F_2 - f_2} = \frac{F_1 - f_1}{F_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8\text{b}).$$

Nennen wir die Entfernung der zusammengehörigen Bilder von den Brennpunkten l_1 und l_2, so dass also

$$l_1 = f_1 - F_1,$$
$$l_2 = f_2 - F_2,$$

so erhalten wir aus der Gleichung 8 a) in derselben Weise die einfachste Form für das Gesetz der Lage der Bilder eines zusammengesetzten Systems, wie wir für die einer einzelnen Fläche aus Gleichung 3 d) die 7 b) erhalten haben, nämlich

$$l_1\, l_2 = F_1\, F_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8\text{c}),$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{\beta_1}{\beta_2} &= -\frac{l_1}{F_1} \\ \frac{\beta_2}{\beta_1} &= -\frac{l_2}{F_2} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8\text{d}).$$

Um endlich das Verhältniss der Grössen F_1 und F_2 zu finden, wenden wir das in der Gleichung 7 d) ausgesprochene Gesetz auf den Strahl an, welcher vor der Brechung durch s und b_1, nach der Brechung also durch b_2 und g geht.

Nennen wir die Grösse eines in der ersten Hauptebene enthaltenen Bildes $\gamma_{,}$, die Reihe der Bilder, welche bei den einzelnen Brechungen in dem Systeme gebildet werden, $\gamma_{,,}$, $\gamma_{,,,}$ etc. und γ_{m+1} das in der zweiten Hauptebene nach der letzten Brechung entworfene. Nach der Definition der Hauptebenen ist $\gamma_{,} = \gamma_{m+1}$. Nennen wir ferner $\alpha_{,}$ den Winkel zwischen dem Strahl $s\, b_{,}$ und der Axe im ersten Mittel, $\alpha_{,,}$, $\alpha_{,,,}$ u. s. w. in den folgenden Mitteln, α_{m+1} im letzten Mittel, so dass

$$\angle\, s\, b_1\, p = -\alpha_{,},$$
$$\angle\, g\, b_2\, f = -\alpha_{m+1}.$$

Nach der Gleichung 7 d) ist

$$n_{,}\gamma_{,}\, tg\, \alpha_{,} = n_{,,}\gamma_{,,}\, tg\, \alpha_{,,},$$
$$n_{,,}\gamma_{,,}\, tg\, \alpha_{,,} = n_{,,,}\gamma_{,,,}\, tg\, \alpha_{,,,}$$

u. s. w., woraus folgt

$$n_{,}\gamma_{,}\, tg\, \alpha_{,} = n_{m+1}\, \gamma_{m+}\, tg\, \alpha_{m+1} \quad \ldots\ldots \quad 9),$$

oder da $\gamma_{,} = \gamma_{m+1}$, so ist

$$n_{,}\, tg\, \alpha_{,} = n_{m+1}\, tg\, \alpha_{m+1} \quad \ldots\ldots \quad 9\text{a}).$$

Ferner ist mit Berücksichtigung der oben aufgestellten Bezeichnungen

$$s\,p = \beta_1 = -f_1\, tg\, \alpha_{,},$$
$$f\,g = -\beta_2 = -f_2\, tg\, \alpha_{m+1}, \quad \text{folglich}$$

$$\frac{n_{,}\beta_1}{f_1} = -\frac{n_{m+1}\,\beta_2}{f_2}.$$

Setzt man in diese Gleichung aus 8 a) den Werth von f_2, so erhält man

$$\frac{n_{,}\beta_1}{f_1 - F_1} = -\frac{n_{m+1}\beta_2}{F_2}$$

und nach 8 b) ist

$$\frac{\beta_1}{f_1 - F_1} = - \frac{\beta_2}{F_1}.$$

Beide Gleichungen durch einander dividirt geben

$$\frac{n_{,}}{n_{m+1}} = \frac{F_1}{F_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9\text{c}),$$

was zu beweisen war.

3. In jedem optischen Systeme giebt es ein und nur ein Paar von **Knotenpunkten**, welche die Eigenschaft haben, dass alle Lichtstrahlen, deren Richtung im ersten Mittel durch den ersten Knotenpunkt geht, nach der letzten Brechung eine ihrer früheren parallele Richtung haben, und durch den zweiten Knotenpunkt gehen. Die durch die Knotenpunkte senkrecht gegen die optische Axe gelegten Ebenen heissen die **Knotenebenen**. Da die im ersten Knotenpunkte sich schneidenden Lichtstrahlen sich also nach der letzten Brechung im zweiten schneiden, so ist der zweite offenbar das Bild des ersten. Die zu ihnen gehörigen Brennweiten verhalten sich umgekehrt wie die Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mediums.

Wir gehen von der in der vorigen Nummer gefundenen Gleichung 9) aus:

$$n_{,} \gamma_{,} \, tg\, \alpha_{,} = n_{m+1} \gamma_{m+1} \, tg\, \alpha_{m+1} \quad \ldots\ldots \quad 9).$$

Wenn wir diese auf die Knotenpunkte beziehen, soll $\alpha_{,} = \alpha_{m+1}$ werden. Dies wird der Fall sein, wenn

$$n_{,} \gamma_{,} = n_m \gamma_m.$$

Die Lineardimensionen zweier zusammengehöriger in den Knotenebenen liegender Bilder verhalten sich also umgekehrt wie die zugehörigen Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mittels.

Da die Bilder desselben Gegenstandes $\gamma_{,}$ sich verhalten wie ihre Abstände vom zweiten Hauptbrennpunkte, so lässt sich dieser Abstand aus der Grösse des Bildes bestimmen. Fällt das Bild des Gegenstandes $\gamma_{,}$ in die zweite Hauptebene, so ist seine Grösse auch gleich $\gamma_{,}$, sein Abstand vom Brennpunkte F_2; fällt es in die zweite Knotenebene, so ist seine Grösse, wie eben bewiesen,

$$\gamma_{m+1} = \frac{n_{m+1}}{n_{,}} \gamma_{,}.$$

Sein Abstand vom Brennpunkte sei G_2, so ist

$$\frac{\gamma_{,}}{\gamma_{m+1}} = \frac{F_2}{G_2}, \text{ also (9c)}$$

$$G_2 = \frac{n_{,}}{n_{m+1}} F_2 = F_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10\text{a}).$$

Der Abstand zwischen der zweiten Haupt- und Knotenebene ist danach

$$a_2 = F_2 - G_2$$
$$= F_2 - F_1.$$

Die erste Knotenebene soll das Bild der zweiten sein. Nennen wir ihren Abstand von der ersten Hauptebene a_1, so dass

$$a_1 = G_1 - F_1.$$

so ergiebt die Gleichung 8 a

$$-\frac{F_1}{a_1} + \frac{F_2}{a_2} = 1, \text{ daher}$$

$$a_1 = a_2 = F_2 - F_1$$

$$G_1 = F_2 \text{ und} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10\text{b})$$

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{n_{m+1}}{n_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10\text{c}).$$

Methoden, die Brenn-, Haupt- und Knotenpunkte eines aus zwei anderen zusammengesetzten centrirten Systems brechender Kugelflächen zu finden.

Es seien gegeben zwei centrirte optische Systeme A und B, welche dieselbe Axe haben. Es seien $p_{,}$ und $p_{,,}$, *Fig. 55*, die beiden Brennpunkte, $a_{,}$ und $a_{,,}$ die

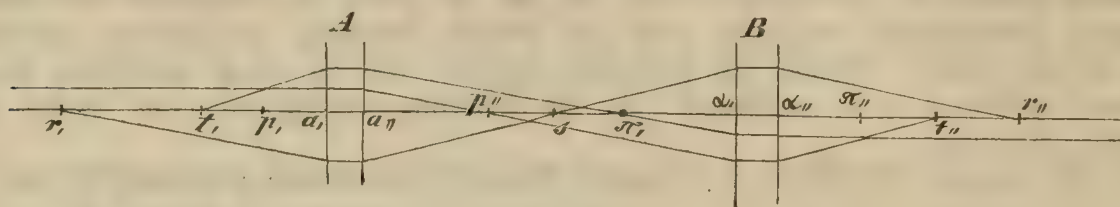


Fig. 55.

beiden Hauptpunkte des Systems A, $\pi_{,}$ und $\pi_{,,}$ die Brennpunkte, $\alpha_{,}$ und $\alpha_{,,}$ die Hauptpunkte von B. Der Abstand des ersten Hauptpunktes $\alpha_{,}$ des zweiten vom zweiten $a_{,,}$ des ersten Systems sei d, und dies werde positiv gerechnet, wenn, wie in *Fig 55*, $\alpha_{,}$ hinter $a_{,,}$ liegt. Die Hauptbrennweiten des ersten Systems $a_{,}p_{,}$ und $a_{,,}p_{,,}$ bezeichnen wir mit $f_{,}$ und $f_{,,}$, die des zweiten $\alpha_{,}\pi_{,}$ und $\alpha_{,,}\pi_{,,}$ mit $\varphi_{,}$ und $\varphi_{,,}$.

Der erste Brennpunkt des combinirten Systems ist offenbar das Bild, welches das System A vom ersten Brennpunkte $\pi_{,}$ des Systems B entwirft. Ist $t_{,}$ dieser Punkt, so ist klar, wie auch durch den in der Figur von $t_{,}$ ausgehenden Strahl angedeutet ist, dass Strahlen, welche von $t_{,}$ ausgehen, nach der Brechung im ersten Systeme A in $\pi_{,}$ sich vereinigen und nach der Brechung im zweiten parallel der Axe werden müssen, so dass also $t_{,}$ der Definition des vorderen Brennpunkts entspricht. Die Entfernung $a_{,,}\pi_{,}$ ist gleich $d - \varphi_{,}$; daraus ergiebt sich für $a_{,}t_{,}$ der Werth

$$a_{,}t_{,} = \frac{(d - \varphi_{,})\, f_{,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}} \quad \ldots\ldots \quad 11\text{a}).$$

Eben so ist der zweite Brennpunkt des combinirten Systems das Bild, welches das zweite System B von dem zweiten Brennpunkte $p_{,,}$ des ersten Systems entwirft. Es sei $t_{,,}$ der Ort dieses Bildes, so ist

$$\alpha_{,,}t_{,,} = \frac{(d - f_{,,})\, \varphi_{,,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}} \quad \ldots\ldots \quad 11\text{b}).$$

Die beiden Hauptpunkte des combinirten Systems sollen jeder des anderen Bild sein, und zwar bezieht sich der erste auf den Gang der Lichtstrahlen im ersten Medium, der zweite auf den im letzten. Die beiden Hauptpunkte müssen daher ein beiden gemeinsames Bild in dem mittleren Medium haben, was zwischen den beiden optischen Systemen vorhanden ist. Es sei dieses Bild s in *Fig. 55*, $r_{,}$ und $r_{,,}$ dagegen die Hauptpunkte des combinirten Systems. Wenn s das Bild von $r_{,}$, und $r_{,,}$ das Bild von s ist, ist auch $r_{,,}$ das Bild von $r_{,}$, und der ersten Bedingung für die beiden Hauptpunkte geschieht dadurch Genüge. Die zweite Bedingung für diese Punkte

ist die, dass zusammengehörige Bilder in den Hauptebenen gleich gross und gleich gerichtet seien. Es sei nun σ die Grösse eines Objects in s, $\beta_{,}$ sein Bild entworfen vom System A in $r_{,}$, $\beta_{,,}$ sein Bild entworfen vom System B in $r_{,,}$, und x gleich der Länge $a_{,,}s$, y gleich $s\alpha_{,}$, so ist nach 8b)

$$\frac{\beta_{,}}{\sigma} = \frac{f_2}{f_2 - x}$$

$$\frac{\beta_{,,}}{\sigma} = \frac{\varphi_{,}}{\varphi_{,} - y}.$$

Soll $\beta_{,} = \beta_{,,}$ sein, so muss

$$\frac{f_2}{f_2 - x} = \frac{\varphi_{,}}{\varphi_{,} - y} \text{ oder}$$

$$\left.\frac{x}{f_2} = \frac{y}{\varphi_{,}}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 11c)$$

$$\text{oder } \frac{a_{,,}s}{a_{,,}p_{,,}} = \frac{\alpha_{,}s}{\alpha_{,}\pi_{,}}.$$

Um also den Punkt im mittleren Medium zu finden, dessen Bilder die beiden Hauptpunkte sind, theile man die Entfernung zwischen dem zweiten Hauptpunkte des ersten und ersten Hauptpunkte des zweiten Systems in zwei Theile, welche sich verhalten wie die zu diesen Hauptpunkten gehörigen Hauptbrennweiten der beiden Systeme.

Da $x + y = d$ ist nach 11c)

$$\frac{x}{f_{,,}} = \frac{d - x}{\varphi_{,}}$$

$$\frac{d - y}{f_{,,}} = \frac{y}{\varphi_{,}}. \text{ Daraus folgt}$$

$$x = \frac{d f_{,,}}{\varphi_{,} + f_{,,}}$$

$$y = \frac{d \varphi_{,}}{\varphi_{,} + f_{,,}}.$$

Aus dem Werthe von x findet man die Entfernung $a_{,}r_{,} = h_{,}$ des ersten Hauptpunktes des combinirten Systems vor dem ersten Hauptpunkte des Systems A,

$$h_{,} = \frac{x f_{,}}{x - f_{,,}}$$

$$\left.h_{,} = \frac{d f_{,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 11d).$$

Ebenso die Entfernung $\alpha_{,,}r_{,,} = h_{,,}$ des zweiten Hauptpunktes des combinirten Systems hinter dem zweiten Hauptpunkte des Systems B,

$$h_{,,} = \frac{\varphi_{,,} y}{y - \varphi_{,}}$$

$$h_{,,} = \frac{d \varphi_{,,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 11e)$$

Daraus ergeben sich die Werthe $F_{,}$ und $F_{,,}$ der Hauptbrennweiten des combinirten Systems:

$$\left.\begin{aligned} F_{,} &= a_{,} t_{,} - a_{,} r_{,} \\ &= \frac{\varphi_{,} f_{,}}{\varphi_{,} + f_{,,} - d} \\ F_{,,} &= \alpha_{,,} t_{,,} - \alpha_{,,} r_{,,} \\ &= \frac{\varphi_{,,} f_{,,}}{\varphi_{,} + f_{,,} - d} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 11\text{f}).$$

Hat man die Haupt- und Brennpunkte gefunden, so findet man die Knotenpunkte sehr leicht, da der Abstand des ersten Knotenpunktes vom ersten Brennpunkte gleich ist der zweiten Hauptbrennweite, der Abstand des zweiten Knotenpunktes vom zweiten Brennpunkte der ersten Hauptbrennweite.

Will man nur die Knotenpunkte, nicht die Hauptpunkte suchen, so kann man ein ähnliches Verfahren einschlagen wie für die Hauptpunkte, wobei man die Bedingung benutzt, dass die linearen Dimensionen zusammengehöriger Bilder in den Knotenebenen sich umgekehrt wie die Brechungsverhältnisse der betreffenden Media verhalten.

Es seien in *Fig.* 33 jetzt $a_{,}$ und $a_{,,}$, $\alpha_{,}$ und $\alpha_{,,}$ nicht mehr die Hauptpunkte, sondern die Knotenpunkte der beiden Systeme A und B, $r_{,}$ und $r_{,,}$ die Knotenpunkte des combinirten Systems, ihr gemeinsames Bild im mittleren Medium der Punkt s, so dass nun

$$\begin{aligned} a_{,} p_{,} &= f_{,,} & \alpha_{,} \pi_{,} &= \varphi_{,,} \\ a_{,,} p_{,,} &= f_{,} & \alpha_{,,} \pi_{,,} &= \varphi_{,} \\ a_{,,} s &= x & \alpha s &= y. \end{aligned}$$

Es ist

$$a_{,} r_{,} = \frac{x f_{,,}}{x - f_{,}}$$

$$a_{,,} r_{,,} = \frac{y \varphi_{,}}{y - \varphi_{,,}}.$$

Ist nun σ die lineare Grösse eines Objects im Punkte s des mittleren Mediums, $\beta_{,}$ die seines vom System A in $r_{,}$ entworfenen Bildes, $\beta_{,,}$ die seines vom System B in $r_{,,}$ entworfenen Bildes, so ist nach den bekannten Eigenschaften der Knotenpunkte

$$\frac{\beta_{,}}{\sigma} = \frac{a\, r_{,}}{x} = \frac{f_{,,}}{x - f_{,}}$$

$$\frac{\beta_{,,}}{\sigma} = \frac{\alpha_{,,} r_{,,}}{y} = \frac{\varphi_{,}}{y - \varphi_{,,}}.$$

Da nun in den Knotenebenen, wenn $n_{,}$ das Brechungsverhältniss des ersten, $n_{,,}$ des letzten, ν des mittleren Mittels ist, sein muss

$$n_{,} \beta_{,} = n_{,,} \beta_{,,}, \text{ so folgt, dass}$$

$$\frac{n_{,} f_{,,}}{x - f_{,}} = \frac{n_{,,} \varphi_{,}}{y - \varphi_{,,}}.$$

Nun ist aber

$$n_{,} f_{,,} = \nu f_{,}$$

$$n_{,,} \varphi_{,} = \nu \varphi_{,,}, \text{ also}$$

$$\frac{f_{,}}{x - f_{,}} = \frac{\varphi_{,,}}{y - \varphi_{,,}} \text{ und}$$

$$\frac{x}{f_{,}} = \frac{y}{\varphi_{,,}} \text{ oder}$$

$$\frac{a_{,,} s}{a_{,,} p_{,,}} = \frac{a_{,} s}{\alpha_{,} \pi_{,}}.$$

Diese selbe Gleichung hatten wir aber auch gefunden in 11 c), als wir angenommen hatten, dass die Punkte $a_{,}$, $a_{,,}$, $\alpha_{,}$, $\alpha_{,,}$, $r_{,}$ und $r_{,,}$ Hauptpunkte seien. Zur Auffindung der Knotenpunkte des combinirten Systems verfährt man also ganz wie zur Auffindung seiner Hauptpunkte, nur dass man dabei von den Knotenpunkten der einzelnen Systeme, nicht von den Hauptpunkten ausgeht.

Wir wollen hier noch die Formeln für den einfachsten Fall hinschreiben, wo jedes der beiden verbundenen Systeme nur aus einer einzelnen Kugelfläche besteht. Es sei r_1 der Radius des ersten, r_2 der der zweiten Fläche, d ihr Abstand von einander, n_1 das Brechungsverhältniss des ersten, n_2 des zweiten, n_3 des dritten Mittels. Dann ist nach 3 a) und 3 b)

$$f_1 = \frac{n_1 r_1}{n_2 - n_1} \qquad \varphi_1 = \frac{n_2 r_2}{n_3 - n_2}$$

$$f_2 = \frac{n_2 r_1}{n_2 - n_1} \qquad \varphi_2 = \frac{n_3 r_2}{n_3 - n_2}.$$

Setzen wir der Kürze wegen

$$n_2 (n_3 - n_2) r_1 + n_2 (n_2 - n_1) r_2 - (n_3 - n_2)(n_2 - n_1) d = N,$$

so sind die Hauptbrennweiten:

$$\left.\begin{aligned} F_1 &= \frac{n_1 n_2 r_1 r_2}{N} \\ F_2 &= \frac{n_2 n_3 r_1 r_2}{N} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 12).$$

Die Entfernungen der Hauptpunkte h_1 und h_2 von den Flächen

$$\left.\begin{aligned} h_1 &= \frac{n_1 (n_2 - n_3) d r_1}{N} \\ h_2 &= \frac{n_3 (n_1 - n_2) d r_2}{N} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 12a).$$

Die Entfernung der Hauptpunkte von einander H

$$H = d \cdot \frac{(n_2 - n_1)(n_3 - n_2)(r_1 - r_2 - d)}{N} \quad \ldots \quad 12b).$$

Für $d = o$ wird $h_1 = h_2 = H = o$

$$F_1 = \frac{n_1 r_1 r_2}{(n_3 - n_2) r_1 + (n_2 - n_1) r_2}$$

$$F_2 = \frac{n_3 r_1 r_2}{(n_3 - n_2) r_1 + (n_2 - n_1) r_2}.$$

Setzen wir hierin $r_2 = r_1$, so erhalten wir

$$F_1 = \frac{n_1 r_1}{n_3 - n_1}$$

$$F_2 = \frac{n_3 r_1}{n_3 - n_1}.$$

Die Brennpunkte und Hauptpunkte sind dann also genau dieselben, als wäre nur eine brechende Fläche vorhanden; das Resultat ist unabhängig von n_2. Daraus folgt:

In einem Systeme von brechenden Kugelflächen können wir uns an jeder brechenden Fläche eine unendlich dünne, durch concentrische Kugelflächen begrenzte Schicht von beliebigem Brechungsverhältnisse eingeschoben denken, ohne die Brechung der Strahlen dadurch zu ändern.

Es wird uns dieser Satz später zur Vereinfachung mancher Betrachtungen dienen.

Endlich will ich noch die Formeln für Linsen mit zwei kugeligen Begrenzungsflächen hersetzen, bei denen das erste und letzte Mittel einander gleich sind, also $n_1 = n_3$.

$$F_1 = F_2 = \frac{n_1 n_2 r_1 r_2}{(n_2 - n_1)\,[n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1)\, d]} \quad \ldots \quad 13).$$

Die Entfernungen der Hauptpunkte, welche in diesem Falle mit den Knotenpunkten zusammenfallen, von den Linsenflächen sind

$$\left.\begin{aligned} h_1 &= \frac{n_1 d r_1}{n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1)\, d} \\ h_2 &= - \frac{n_1 d r_2}{n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1)\, d} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 13\text{a}).$$

Die Entfernung der Hauptpunkte von einander

$$H = d \cdot \frac{(n_2 - n_1)(d + r_2 - r_1)}{n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1)\, d} \quad \ldots\ldots \quad 13\text{b}).$$

Die beiden ersten sind positiv gerechnet, wenn sie ausserhalb der Linse liegen.

Den Punkt in der Linse, dessen Bilder die beiden Knotenpunkte sind, nennt man in diesem Falle das optische Centrum der Linse. Es liegt in der optischen Axe, und seine Entfernungen von den beiden Flächen verhalten sich zu einander wie die Radien dieser Flächen.

Da die Resultate der Brechung in einem optischen Systeme, was Grösse und Lage der Bilder betrifft, nur von der Lage der Brennpunkte und Hauptpunkte (oder Knotenpunkte abhängen, so kann man ohne Aenderung der Lage und Grösse der Bilder zwei optische Systeme für einander substituiren, deren Brennpunkte und Hauptpunkte dieselbe Lage haben. Da das Verhältniss des Brechungsvermögens des ersten und letzten Mittels nicht geändert werden kann, ohne das Verhältniss der Hauptbrennweiten zu einander zu ändern, wollen wir voraussetzen, dass das erste und letzte Mittel bei einer solchen Substitution ungeändert bleibe. Dann braucht nur die eine Hauptbrennweite und der Abstand der Hauptpunkte von einander in dem einen System gleich den entsprechenden Grössen des anderen gemacht zu werden, um die beiden Systeme für einander substituiren zu können. In einem Systeme von nur zwei brechenden Flächen würde man zur Erfüllung dieser Bedingungen über 4 Grössen, r_1, r_2, n_2 und d, bestimmen können. Es kann daher für jedes centrirte System brechender Kugelflächen ein System von nur zwei solchen Flächen gesetzt werden, welches eben so grosse und

eben so gelegene Bilder entwirft wie jenes, und im Allgemeinen kann man dabei sogar noch immer zwei andere Bedingungen für das System von zwei Flächen aufstellen, z. B. dass es aus einem bestimmten Stoffe zu bilden sei u. s. w., und diese gleichzeitig erfüllen.

Für den Fall, wo das erste und letzte Mittel identisch sind, beide ein kleineres Brechungsvermögen haben als das mittlere Mittel, und der Abstand der brechenden Flächen kleiner ist als die Krümmungsradien, also für die sogenannten Linsen, will ich hier noch die einzelnen Fälle durchgehen, weil wir auf dergleichen Linsen oft zurückkommen werden.

Man unterscheidet nach der Gestalt 1) biconvexe Linsen, bei denen beide Flächen convex, also r_1 positiv, r_2 negativ ist; die Brennweite ist immer positiv nach Gleichung 13). Die Abstände der Hauptpunkte von den Flächen sind negativ, d. h. diese Punkte liegen innerhalb der Linse, und der Abstand der Hauptpunkte von einander ist positiv, d. h. der erste liegt vor dem zweiten. In *Fig. 54* ist die Lage der Brennpunkte p_1 p_2 und Hauptpunkte h_1 und h_2 einer biconvexen Linse dargestellt. Die erste und zweite Fläche der Linse sind mit *1* und *2* bezeichnet. Ein Grenzfall der biconvexen Linsen sind die planconvexen, bei denen einer der Radien unendlich gross wird, und ein Hauptpunkt in die gekrümmte Fläche der Linse fällt.

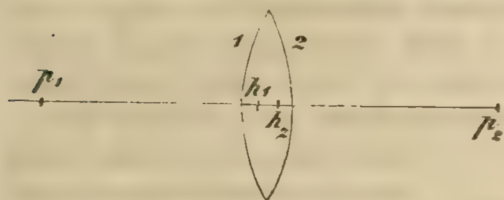


Fig. 54.

2) Biconcave Linsen mit zwei concaven Flächen; r_1 ist negativ, r_2 positiv. Die Brennweiten negativ, die Abstände der Hauptpunkte von den Flächen beide negativ, d. h. die Hauptpunkte liegen innerhalb der Linse. Ihr Abstand ist positiv, d. h. der erste liegt vor dem zweiten. *Fig. 55* stellt die Lage der Hauptpunkte h_1 und h_2, so wie der Brennpunkte p_1 und p_2 einer biconvexen Linse dar. Einen Grenzfall bilden die planconcaven Linsen, bei denen einer der Radien unendlich wird und einer der Hauptpunkte in die gekrümmte Fläche fällt.

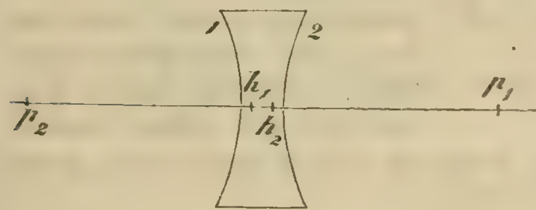


Fig. 55.

3) Concavconvexe Linsen, beide Radien entweder positiv oder negativ. Wir wollen das erstere annehmen; der zweite Fall ergiebt sich aus diesem sogleich, wenn wir nachher die erste Seite der Linse zur zweiten machen. Die Brennweite wird positiv, wenn

$$n_2 (r_2 + d - r_1) > n_1 d;$$

sie wird unendlich, wenn beide Seiten der Gleichung gleich sind; sie wird negativ, wenn der Ausdruck links kleiner als der rechts ist. Der Ausdruck $r_2 + d - r_1$ ist der Abstand des Krümmungsmittelpunkts der zweiten Fläche von dem der ersten nach hinten gerechnet. Liegt der zweite Mittelpunkt hinter dem ersten, so wird die Linse von ihrer Mitte nach dem Rande zu dünner; liegt jener vor dem ersten, so wird sie dicker. Man kann also sagen: Wird eine concavconvexe Linse nach dem Rande zu dicker, so ist ihre Brennweite negativ, und soll ihre Brennweite positiv sein, so muss sie nach dem Rande hin dünner werden. Aber man darf beide Sätze nicht umkehren, wie es oft geschieht.

Der erste Hauptpunkt liegt vor der convexen Fläche (d. h. an ihrer convexen Seite), wenn die Brennweite positiv ist, entfernt sich sehr weit, bis in das Unendliche, wenn die Brennweite selbst sehr gross und unendlich wird. Wird die Brennweite negativ, so liegt der erste Hauptpunkt hinter der convexen Fläche der

Linse, d. h. auf ihrer concaven Seite, ebenfalls unendlich weit entfernt, wenn die Brennweite unendlich sein sollte.

Der zweite Hauptpunkt liegt vor der concaven Fläche der Linse, d. h. auf ihrer convexen Seite, wenn die Brennweite der Linse positiv, er liegt hinter dieser Fläche, wenn die Brennweite negativ ist, und rückt ebenfalls in das Unendliche hinaus, wenn die Brennweite unendlich gross wird. Bei einer positiven Brennweite liegt der zweite Hauptpunkt immer hinter dem ersten, d. h. der Linse näher. Bei einer negativen liegt er hinter dem ersten, d. h. der Linse ferner, wenn die Linse nach ihrem Rande zu dicker wird; er liegt dagegen vor dem ersten, wenn die Linse bei negativer Brennweite von der Mitte nach dem Rande dünner wird; er fällt mit ihm zusammen, wenn die beiden Linsenflächen concentrischen Kugeln angehören, und zwar liegen beide Hauptpunkte dann in dem gemeinschaftlichen Centrum der Kugeln. *Fig. 36* stellt eine concavconvexe Linse von positiver Brennweite dar, *Fig. 37* eine solche von negativer Brennweite, die nach dem Rande zu dicker wird, *Fig. 38* eine solche von negativer Brennweite, welche nach dem Rande zu dünner wird. Der Krümmungsmittelpunkt der ersten Fläche ist mit c_1, der der zweiten mit c_2 bezeichnet. Ich bemerke noch, dass die Brennpunkte nie in die Linse und stets auf entgegengesetzte Seiten derselben fallen. Was die Lage der Bilder betrifft, so verwandelt sich die Gleichung 8 a) und 8 b), wenn die beiden Brennweiten gleich werden, in folgende:

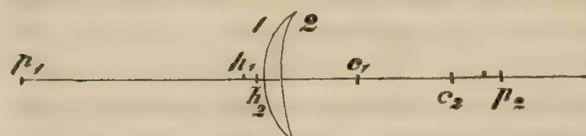


Fig. 36.

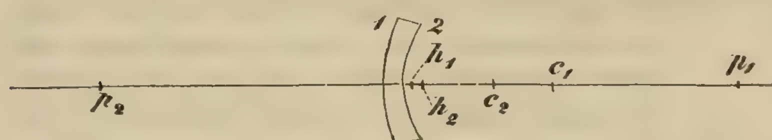


Fig. 37.

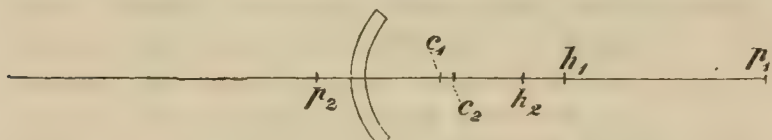


Fig. 38.

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F} \text{ oder } \Bigg\} \quad \ldots\ldots \quad 14)$$

$$f_2 = \frac{F f_1}{f_1 - F} \Bigg\} \quad \ldots\ldots \quad 14\,a)$$

und

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{F}{F - f_1} = \frac{F - f_2}{F} \Bigg\} \quad \ldots\ldots \quad 14\,b).$$

Bei Linsen mit positiver Brennweite (Sammellinsen, Collectivlinsen) liegen nach diesen Formeln die Bilder unendlich weit entfernter reeller Objecte, für welche also $f_1 = \infty$, im zweiten Brennpunkte hinter der Linse und sind im Verhältniss zum Objecte unendlich klein und umgekehrt. Wenn das Object sich der Linse nähert, entfernen sich die Bilder von ihr, bleiben reell, umgekehrt und nehmen an Grösse zu, bis $f_1 = F$ geworden, das Object also in den vorderen Brennpunkt gerückt ist, wo die Entfernung und Grösse des Bildes unendlich werden. Man ersieht dies leicht aus Gleichung 14), die man so schreiben kann:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{F} - \frac{1}{f_1}.$$

Wenn f_1 abnimmt von ∞ bis F, nimmt $\frac{1}{f_1}$ zu von 0 bis $\frac{1}{F}$, und $\frac{1}{f_2}$ nimmt ab von $\frac{1}{F}$ bis 0, d. h. f_2 nimmt zu von F bis ∞. Die Grösse des Bildes

$$\beta_2 = -\beta_1 \frac{F}{f_1 - F}$$

ist immer negativ, so lange $f_1 > F$. Wenn f_1 von ∞ abnimmt bis F, nimmt der Nenner des Bruchs ab von ∞ bis 0, und β_2 geht über von 0 bis $-\infty$.

Eben so findet man nun weiter, dass, wenn das Object vom ersten Brennpunkte zum ersten Hauptpunkte fortrückt, f_2 von $-\infty$ bis 0 geht, d. h. das Bild, welches nun meist virtuell ist und auf derselben Seite der Linse mit dem Objecte liegt, aus unendlicher Entfernung bis zum zweiten Hauptpunkte heranrückt und dabei eine positive Grösse hat, d. h. aufrecht steht und von $+\infty$ bis zu einer dem Objecte gleichen Grösse abnimmt.

Endlich kann f_1 auch negativ werden, wobei meist das Object virtuell wird; dann ist f_2 stets positiv und kleiner als f_1, das Bild aufrecht und kleiner als das Object. Während f_1 von 0 bis $-\infty$, geht f_2 von 0 bis F, β_2 von β_1 bis 0.

Man kann also sagen: Sammellinsen machen parallel eintretende Strahlen convergent und vereinigen sie in der Brennebene; sie machen convergente Strahlen noch convergenter und divergente Strahlen weniger divergent oder auch convergent, ersteres, wenn sie von einem Punkte jenseits des Brennpunktes divergiren, letzteres, wenn von einem solchen diesseits des Brennpunktes.

Linsen von negativer Brennweite nennen wir dispansive oder Zerstreuungslinsen, weil parallel eintretende Strahlen durch sie divergent gemacht, zerstreut werden, divergente noch mehr divergent, convergente weniger convergent oder divergent werden.

Setzen wir den absoluten Werth der negativen Brennweite der Linse gleich P, so das $P = -F$, so wird

$$\frac{1}{f_2} = -\frac{1}{P} - \frac{1}{f_1}$$

$$\beta_2 - \beta_1 \frac{P}{f_1 + P}.$$

Daraus folgt, dass für jeden positiven Werth von f_1 jetzt f_2 negativ ist, und dass, während f_1 von ∞ bis 0 abnimmt, f_2 von $-P$ bis 0 sich verändert, β_2 von 0 bis β_1. Dispansive Linsen entwerfen also von reellen Objecten, die vor dem ersten Hauptpunkte liegen, virtuelle Bilder, welche vor dem zweiten Hauptpunkte liegen, kleiner, näher und aufrecht sind.

Für negative Werthe von f_1, welche absolut kleiner als P sind, wird f_2 positiv, und während f_1 von 0 bis $-P$ geht, steigt f_2 von 0 bis $+\infty$, β_2 von β_1 bis ∞. Convergent einfallende Strahlen werden also weniger convergent, wenn sie nach einem vor dem hinteren Brennpunkte gelegenen Punkte convergiren.

Für negative Werthe von f_1, welche absolut grösser sind als P, werden f_2 und β_2 negativ, es entstehen also umgekehrte virtuelle Bilder vor dem Glase. Während f_1 sich ändert von $-P$ bis $-\infty$, ändert sich f_2 von $-\infty$ bis $-P$, und β_2 von $-\infty$ bis 0. Convergente Strahlen werden von dispansiven Linsen also divergent gemacht, wenn sie nach einem jenseits des hinteren Brennpunktes gelegenen Punkte convergiren.

Die Entfernung e zweier zusammengehöriger Bilder von einander ist $f_1 + a + f_2$, wenn a der Abstand der Hauptpunkte von einander ist, und diese Entfernung positiv

gerechnet wird, falls das zweite Bild hinter dem ersten liegt. Setzen wir statt f_2 seinen Werth, so erhalten wir als Ausdruck für die Entfernung:

$$e = \frac{f_1^2}{f_1 - F} + a.$$

Differentiiren wir diese Gleichung nach f_1, so erhalten wir

$$\frac{de}{df_1} = \frac{f_1^2 - 2 f_1 F}{(f_1 - F)^2}.$$

Hiernach wird $de = 0$, d. h. e ein Maximum oder Minimum, wenn entweder $f_1 = 0$ oder $f_1 = 2F$, und zwar wird es sowohl für positive wie negative Brennweiten ein Minimum für $f_1 = 2F$, und ein Maximum für $f_1 = 0$, wie man leicht aus dem Ausdruck für e erkennt.

Werke, in welchen die Brechung der Lichtstrahlen in centrirten Systemen kugeliger Flächen behandelt wird, sind folgende:

1738. Cotes in Smith *a complete system of optics.* Cambridge. Vol. II. 76.
1757 u. 61. Euler in *Histoire de l'Acad. roy. de Berlin pour* 1757. p. 283. — Ibid. *pour* 1761. p. 201.
1765. Euler *Précis d'une théorie générale de la dioptrique* in *Hist. de l'acad. roy. des sc. de Paris.* 1765. p. 555.
1788 u. 1803. Lagrange in *Nouv. Mém. de l'acad. roy. de Berlin pour* 1778. p. 162. — Ibid. 1803. p. 1.
1822. Piola in *Effemeridi astron. di Milano per* 1822.
1830. Möbius in Crelle's Journal für Mathematik. Bd. V. S. 113.
1841. *Bessel in Astronom. Nachrichten. Bd. XVIII. S. 97.
*Gauss Dioptrische Untersuchungen. Göttingen. — Abdruck aus Abhandl. d. Kön. Ges. d. Wiss. zu Göttingen. Th. 1. von den Jahren 1838—43.
1844. Encke De formulis dioptricis. Ein Programm. Berlin.
Moser Ueber das Auge, in Dove's Repert. d. Physik. Bd. V. S. 289.
1851. Listing Art. Dioptrik des Auges, in R. Wagner's Handwörterbuch d. Physiologie. Bd. IV. S. 451.

§. 10. Brechung der Strahlen im Auge.

Das Auge verhält sich gegen das einfallende Licht im Wesentlichen wie eine *Camera obscura.* Das von einem leuchtenden Punkte ausgegangene Licht muss, wenn dieser Punkt deutlich gesehen werden soll, durch die brechenden Mittel des Auges so gebrochen werden, dass alles auch wieder auf einem Punkte der Netzhaut vereinigt wird. Auf der Fläche dieser Haut wird daher ein reelles optisches Bild der äusseren gesehenen Gegenstände entworfen. Dasselbe ist umgekehrt und verkleinert. Man kann es an frisch ausgeschnittenen Augen sichtbar machen, wenn man vorsichtig den hinteren mittleren Theil der Sclerotica und Chlorioidea entfernt, die Netzhaut aber stehen lässt, und nun die Hornhaut eines so präparirten Auges gegen helle Gegenstände kehrt. Das Bild erscheint alsdann klein, hell, scharf und, wie angegeben, umgekehrt auf der stehengebliebenen Netzhaut. Noch besser ist das Bildchen nach der Methode von Gerling[1] zu sehen, wenn man die Elemente der Netzhaut mit einem Pinsel entfernt, und dann ein Täfelchen von Glas oder Glimmer in die Oeffnung einschiebt. Ohne viele Mühe kann man die Netzhautbildchen auch in den Augen weisser Kaninchen sehen, denen das Pigment der Aderhaut fehlt. Bei diesen braucht man nicht einmal die

[1] Poggendorff Ann. XLVI. 243.

harte Haut zu entfernen, sondern sieht das Bild durch sie hindurchscheinen, allerdings nicht so scharf wie bei freigelegter Netzhaut, aber doch deutlich genug, um seine Stellung, Grösse u. s. w. zu erkennen. Auch ist es bei lebenden Menschen, namentlich bei blonden Personen mit hellblauen Augen, welche wenig Pigment in der Aderhaut zu haben pflegen, zuweilen möglich, das Bild durch die harte Haut hindurch zu sehen. Man lässt einen solchen in einem verdunkelten Zimmer das Auge so drehen, dass die Hornhaut im äusseren Augenwinkel steht, und in dem grösseren mittleren und inneren Theile der Augenlidspalte daher die innere Seite der weissen Sehnenhaut erscheint. Hält man dann noch weiter seitlich, als die seitlich gekehrte Sehaxe steht, eine Kerzenflamme, so erscheint deren Bild auf der inneren Seite der Netzhaut, und schimmert oft so deutlich durch die weisse Sehnenhaut hindurch, dass man die umgekehrte Stellung des Bildes, die Spitze der Flamme und den Ort des Dochtes erkennen kann [1].

Die genaueste Untersuchung der Netzhautbildchen im lebenden Auge des Menschen ist mittels des in §. 16 zu beschreibenden Augenspiegels möglich. Mit diesem Instrumente kann man von vorn in das Auge hineinblicken, und die Netzhaut selbst mit ihren Gefässen, sowie die auf ihr entworfenen optischen Bilder deutlich sehen. Man überzeugt sich leicht davon, dass von hinreichend hellen Objecten, welche das beobachtete Auge deutlich sieht, sehr scharfe und genau begrenzte optische Bilder auf der Fläche der Netzhaut entworfen werden.

Bei der Beschreibung der Netzhaut habe ich schon erwähnt, dass im Hintergrunde des Auges sich eine eigenthümlich gebaute Stelle der Netzhaut finde, der gelbe Fleck. In seiner Mitte, der sogenannten Netzhautgrube, verschwinden die Gefässe ganz, welche sich in den übrigen Theilen der Netzhaut verästeln, hier finden sich nur nervöse Elemente vor, und zwar von den Schichten der Netzhaut, wie es scheint, nur Nervenzellen und Zapfen. Diese Stelle ist in physiologischer Hinsicht von der grössten Wichtigkeit als die Stelle des directen Sehens. Derjenige Punkt des Gesichtsfeldes, welchen wir direct betrachten, oder mit dem Blicke fixiren, wird jedes Mal an dem Orte der Netzhautgrube abgebildet. Mittels des Augenspiegels kann dieser Satz, von dessen Richtigkeit man sich schon längst wegen der besonderen Structur des gelben Flecks überzeugt hielt, auch durch directe Beobachtungen erwiesen werden. Den Ort des gelben Flecks erkennt man mit dem Augenspiegel, wenn die ganze Netzhaut erleuchtet ist, an dem Mangel der Gefässe. In der Mitte der gefässlosen Stelle, entsprechend dem Orte der Netzhautgrube, findet sich eine eigenthümlich helle Stelle, welche Coccius [2] zuerst beschrieben hat, und deren Helligkeit er einem Reflexe der Netzhautgrube zuschreibt. Donders [3] hat ferner gezeigt, dass dieser helle Reflex stets an derjenigen Stelle des optischen Bildes erscheint, welche das beobachtete Auge im Gesichtsfelde fixirt, und ich habe mich von der Richtigkeit dieser Angabe überzeugt. Man kann nach der Stellung des sogenannten Reflexes der Netz-

[1] Volckmann, Artikel: Sehen in Wagner's Handwörterbuch d. Physiologie. S. 286—289.
[2] Ueber die Anwendung des Augenspiegels. Leipzig 1853. S. 64.
[3] Onderzoekingen gedaan in het Physiolog. Laborat. d. Utrecht'sche Hoogeschool. Jaar VI. S. 133.

hautgrube dem beobachteten Individuum genau bezeichnen, welchen Punkt es fixirt, und wenn man ihm Anweisung giebt, bald diesen, bald jenen Punkt des Gegenstandes zu fixiren, sieht man den Reflex immer auf den entsprechenden Punkt des Bildes sich einstellen. Die Ausführung dieser Versuche wird in §. 16 beschrieben werden.

Nur in der Gegend der Augenaxe pflegt das optische Bild auf der Netzhaut seine volle Schärfe zu haben, von ihr entfernter ist es weniger gut begrenzt. Wir sehen deshalb im Gesichtsfelde in der Regel nur den einen Punkt deutlich, welchen wir fixiren, alle übrigen undeutlich. Diese Undeutlichkeit im indirecten Sehen scheint übrigens auch durch eine geringere Empfindlichkeit der Netzhaut bedingt zu sein; sie ist schon in geringerer Entfernung von dem fixirten Punkte viel bedeutender als die objective Undeutlichkeit der Netzhautbilder. Das Auge stellt ein optisches Werkzeug von sehr grossem Gesichtsfelde dar, aber nur an einer kleinen, sehr engbegrenzten Stelle dieses Gesichtsfeldes sind die Bilder deutlich. Das ganze Feld entspricht einer Zeichnung, in der nur der wichtigste Theil des Ganzen sorgfältig ausgeführt, die Umgebungen aber nur skizzirt, und zwar desto roher skizzirt sind, je weiter sie von dem Hauptgegenstande abstehen. Durch die Beweglichkeit des Auges wird es aber möglich, nach einander jeden einzelnen Punkt des Gesichtsfeldes genau zu betrachten Da wir zu einer Zeit doch nur einem Gegenstande unsere Aufmerksamkeit zuwenden können, ist der eine deutlich gesehene Punkt ausreichend, sie vollständig zu beschäftigen, so oft wir sie auf Einzelheiten lenken wollen, und wiederum ist das grosse Gesichtsfeld trotz seiner Undeutlichkeit geeignet, die Hauptzüge der ganzen Umgebung mit einem schnellen Blicke aufzufassen, und neu auftauchende Erscheinungen an den Seiten des Gesichtsfeldes sogleich zu bemerken.

Das Gesichtsfeld eines einzelnen Auges wird bestimmt durch die Weite der Pupille und ihre Lage zum Rande der Hornhaut. Ich finde, dass ich in einem dunklen Zimmer, wenn ich mein Auge in einem Spiegel besehe, und seitlich ein Licht aufstelle, die Anwesenheit des Lichts so lange noch wahrnehme, als Strahlen von dem Lichte auf den gegenüberliegenden Rand der Pupille und in diese selbst fallen. Alles Licht also, was durch die Hornhaut in die Pupille fällt, wird noch empfindliche Theile der Netzhaut treffen. Die Pupille liegt zwar etwas weiter zurück als der äussere Hornhautrand, aber wegen der Brechung in der Hornhaut können selbst noch Strahlen in sie einfallen, welche senkrecht gegen die Augenaxe verlaufend auf den Rand der Hornhaut fallen, so dass das Gesichtsfeld eines einzelnen Auges etwa einer halben Kugel entspricht, eine Grösse, welche keinem künstlichen optischen Instrumente zukommt. Individuelle Verschiedenheiten müssen darin vorkommen, abhängig von der Weite und Lage der Pupille. Da beim Sehen für die Nähe die Pupille sich der Hornhaut nähert, wird das Gesichtsfeld dabei etwas grösser, wie ich an meinen Augen wenigstens leicht erkennen kann, wenn ich am äussersten Rande des Gesichtsfeldes ein recht helles Licht anbringe.

Ein Theil des Gesichtsfeldes jedes einzelnen Auges nach innen, oben und unten wird durch Theile des Antlitzes, Nase, Augenbrauenrand, Wangen, eingenommen, nur nach aussen hin ist es ganz frei. Beide Augen zusammen über-

schauen aber, wenn ihre Axen parallel in die Ferne gerichtet sind, einen horizontalen Bogen von 180 oder mehr Graden. Vergrössert wird das überschaubare Feld noch durch die Bewegungen der Augen, auf welche wir später zurückkommen.

Die Lichtstrahlen, welche von einem entfernteren leuchtenden Punkte auf das Auge fallen, werden zuerst von der Hornhaut gebrochen, und zwar so, dass sie ungestört weitergehend sich etwa 10 Mm. hinter der Netzhaut in einem Punkte vereinigen würden. Indem sie somit convergirend durch die vordere Augenkammer gehen, treffen sie auf die Krystallinse, werden von dieser noch convergenter gemacht, und können in Folge dessen nun schon auf der Netzhaut zur Vereinigung gelangen.

Die stärksten Brechungen der Lichtstrahlen geschehen an der Hornhaut, demnächst an der vorderen und hinteren Fläche der Krystallinse. Aber auch im Inneren der Krystallinse finden an den Grenzen ihrer einzelnen Schichtflächen Brechungen statt, da diese Schichten von verschiedener Dichtigkeit sind. Wir können diese verschiedenen brechenden Flächen annähernd gleichsetzen einem System von Rotationsflächen, deren Axen alle in eine gerade Linie zusammenfallen. Wenn auch kleine Abweichungen in der Lage der Axen der einzelnen Flächen bei den meisten menschlichen Augen vorzukommen scheinen, so sind diese doch so gering, dass wir sie in Bezug auf die Lage und Grösse der optischen Bilder vernachlässigen und das Auge als ein centrirtes optisches System betrachten können.

Die Axe dieses Systems, deren vorderes Ende etwa mit dem Mittelpunkte der Hornhaut zusammenfällt, während das hintere zwischen dem gelben Flecke und der Eintrittsstelle des Sehnerven hindurchgeht, nennen wir die Augenaxe.

Die Lage der Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte des Auges unterliegt wohl ziemlich bedeutenden individuellen Verschiedenheiten, da überhaupt die meisten Abmessungen des Auges und seiner einzelnen brechenden Flächen bei verschiedenen Menschen so von einander abweichen, wie man es bei einem Organe, dessen Wirkungen eine so grosse Genauigkeit der Construction zu verlangen scheinen, kaum erwarten sollte. Ausserdem werden wir weiter unten sehen, dass auch in jedem einzelnen Auge diese Punkte ihre Lage ändern, wenn das Auge nach einander Gegenstände in verschiedener Entfernung betrachtet. Man kann über die Lage der genannten Punkte im normalen, fernsehenden Auge nur etwa so viel sicher aussagen: Der erste Hauptpunkt ist dem zweiten Hauptpunkte sehr nahe, ebenso der erste dem zweiten Knotenpunkte. Die beiden Hauptpunkte des Auges liegen etwa in der Mitte der vorderen Augenkammer, die beiden Knotenpunkte sehr nahe der hinteren Fläche der Linse, der zweite Brennpunkt dicht vor oder auf der Netzhaut.

Da es bei sehr vielen Gelegenheiten nothwendig ist, wenigstens angenäherte Werthe für die einzelnen optischen Constanten des Auges zu kennen, so will ich hier die Werthe anführen, welche Listing für ein schematisches mittleres Auge gewonnen hat, indem er, den bis dahin ausgeführten Messungen sich möglichst anschliessend, einfache abgerundete Zahlen für die hier in Betracht kommenden Grössen wählte.

Listing nimmt an

1) das Brechungsvermögen der Luft gleich 1
2) das Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit . . . . . . $\frac{103}{77}$
3) Brechungsvermögen der Krystallinse . . . . $\frac{16}{11}$
4) Brechungsvermögen des Glaskörpers . . . . $\frac{103}{77}$
5) Krümmungshalbmesser der Hornhaut . . . . 8 Mm.
6) Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche . . . . 10 „
7) Krümmungshalbmesser der hinteren Linsenfläche . . . . 6 „
8) Entfernung der vorderen Hornhaut- und vorderen Linsenfläche 4 „
9) Dicke der Linse . . . . 4 „

Er berechnet aus diesen Annahmen:

1) Der erste Brennpunkt liegt 12,8326 Mm. vor der Hornhaut, der zweite Brennpunkt 14,6470 Mm. hinter der Hinterfläche der Linse.
2) Der erste Hauptpunkt liegt 2,1746 Mm., der zweite 2,5724 Mm. hinter der Vorderfläche der Hornhaut, ihr gegenseitiger Abstand beträgt 0,3978 Mm.
3) Der erste Knotenpunkt liegt 0,7580 Mm., der zweite 0,3602 Mm. vor der Hinterfläche der Linse.
4) Die erste Hauptbrennweite des Auges beträgt hiernach 15,0072 Mm., die zweite 20,0746 Mm.

Die Lage der Hauptpunkte $h_{,}$ und $h_{,,}$, Knotenpunkte $k_{,}$ und $k_{,,}$, Brennpunkte $F_{,}$ und $F_{,,}$ nach Listing ist in *Fig. 59* angegeben. Unter den von Listing der Berechnung zu Grunde gelegten Werthen könnten allein die des Brechungsvermögens und der Krümmungsradien der Linse zweifelhaft erscheinen. Doch stimmt die daraus berechnete Brennweite der Linse so gut mit directen Messungen, die ich selbst ausgeführt habe, dass die optische Wirkung der Linse in Listing's sche-

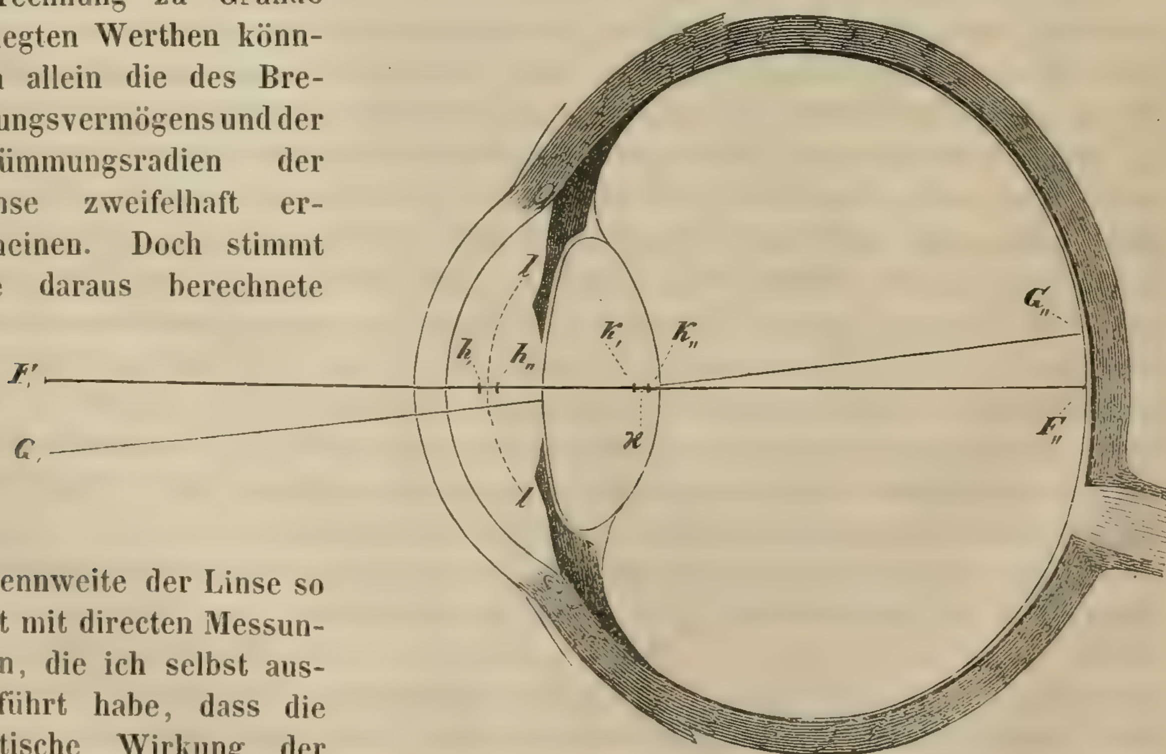


Fig. 39.

matischem Auge jedenfalls nicht wesentlich von der des natürlichen Auges abweicht. Die Werthe, welche für die Brechung in der Hornhaut wichtig sind, sind durch Messungen hinreichend begründet. Wir brauchen also nicht zu zweifeln, dass LISTING's Schema mit dem natürlichen Verhältnisse wirklich so gut übereinstimmt, als es bei der grossen Breite der individuellen Unterschiede möglich ist.

Vermittelst der angegebenen Cardinalpunkte des Auges lässt sich der Weg eines gegebenen einfallenden Strahls nach der letzten Brechung vermöge der in §. 9 vorgeschriebenen Constructionen finden; ebenso der Ort des Bildes eines beliebigen, in der Nähe der Augenaxe liegenden leuchtenden Punktes. Da übrigens sowohl die beiden Hauptpunkte des Auges, als auch die beiden Knotenpunkte einander sehr nahe liegen, so kann man ohne erhebliche Beeinträchtigung der Genauigkeit des Resultats die beiden Hauptpunkte in einen Punkt zusammenziehen und ebenso die beiden Knotenpunkte. Man erhält dadurch ein noch mehr vereinfachtes Schema des Auges, welches LISTING das reducirte Auge nennt. Er legt den einfachen Hauptpunkt eines solchen Auges 2,3448 Mm. hinter die Vorderfläche der Hornhaut, den Knotenpunkt $\varkappa$ *Fig. 59* 0,4764 Mm. vor die hintere Fläche der Linse, die Brennpunkte bleiben unverändert. Die Wirkung des reducirten Auges würde durch eine brechende Kugelfläche hervorgebracht werden können, deren Mittelpunkt der Knotenpunkt wäre, und deren Scheitel im Hauptpunkt läge, während sich vor ihr Luft, hinter ihr wässrige Feuchtigkeit oder Glaskörper befände. Der Krümmungshalbmesser einer solchen Fläche würde 5,1248 Mm. betragen. Bei vielen theoretischen Betrachtungen, wo es nur auf die Grösse und Lage der Bilder ankommt, kann man sich durch Anwendung dieses reducirten Schemas des Auges die Untersuchung sehr erleichtern. In *Fig. 59* ist die brechende Kugelfläche des reducirten Auges durch den gestrichelten Bogen $l\,l$, ihr Mittelpunkt bei $\varkappa$ angegeben.

In dem sehr häufig vorkommenden Falle, wo man weiss, dass genaue optische Bilder auf der Netzhaut entworfen werden, und es nur darauf ankommt, den Ort des Bildes für einen bestimmten Punkt des Gegenstandes zu finden, genügt die Kenntniss der Knotenpunkte. Erlaubt man sich dabei die Vereinfachung, nur einen Knotenpunkt anzunehmen, so findet man den Ort des Bildes, wenn man von dem leuchtenden Punkte eine gerade Linie nach dem Knotenpunkte zieht und diese bis zur Netzhaut verlängert; wo sie die Netzhaut trifft, ist der Ort des Bildes. Eine solche gerade Linie nennt man Richtungslinie des Sehens. Der einfach gedachte Knotenpunkt ist also der Kreuzungspunkt der Richtungslinien. Das vor der Hornhaut und das hinter der Linse liegende Stück einer solchen Linie würde zugleich dem Wege eines gewissen Strahls angehören, den man Richtungsstrahl nennen kann. Nur zwischen der vorderen Hornhaut- und hinteren Linsenfläche fällt der Richtungsstrahl nicht nothwendig mit der Richtungslinie zusammen.

Will man die genauere Construction machen, wobei man beide Knotenpunkte als getrennt betrachtet, so hat man zwei Richtungslinien zu unterscheiden. Die erste geht vom leuchtenden Punkte zum ersten Knotenpunkte, und die zweite ist parallel mit der ersten durch den zweiten Knotenpunkt zu legen.

Wo letztere die Netzhaut schneidet, ist der Ort des Bildes. Das ausserhalb des Auges liegende Stück der ersten Richtungslinie und das im Glaskörper liegende Stück der zweiten gehören wieder dem Wege eines Lichtstrahls an, des Richtungsstrahls.

Ich nenne den Richtungsstrahl, welcher die Stelle des directen Sehens trifft, die Gesichtslinie. Der vordere gerade Theil der Gesichtslinie geht also von dem fixirten Punkte des Gesichtsfeldes in der Richtung des ersten Knotenpunktes, der hintere gerade Theil von dem zweiten Knotenpunkte her nach der Netzhautgrube. Da man früher den gelben Fleck meist in dem hinteren Ende der optischen Axe des Auges gelegen glaubte, hielt man die Gesichtslinie auch für identisch mit der Augenaxe, und nannte diese Linie auch wohl Sehaxe oder Gesichtsaxe. Nach meinen Untersuchungen sind aber beide merklich von einander unterschieden. Vor dem Auge liegt die Gesichtslinie nach innen und meist etwas nach oben von der Augenaxe, die Netzhautgrube also nach aussen und meist etwas nach unten von der Axe. Ich habe in *Fig. 59* die Lage der Gesichtslinie $G_{\prime} G_{\prime\prime}$ im horizontalen Durchschnitte des Auges angegeben, sowie ich sie in einem gut gebildeten Auge im Verhältnisse zur Augenaxe $F_{\prime} F_{\prime\prime}$ liegen fand. Die obere Seite der Figur ist die Schläfenseite, die untere die Nasenseite.

Um die Brechung der Lichtstrahlen in den einzelnen Mitteln des Auges zu berechnen, theilen wir uns das optische System des Auges in zwei Theile, deren ersten die Hornhaut, deren zweiten die Krystalllinse ausmacht, so dass das erste Mittel des ersten Systems Luft, das Mittel zwischen beiden Systemen, oder das letzte des ersten, das erste des zweiten Systems wässrige Feuchtigkeit, das letzte Mittel des zweiten Systems Glaskörper ist.

Wir beginnen mit der Hornhaut. Die Untersuchung der Brechung in dieser wird wesentlich vereinfacht durch den Umstand, dass die Hornhaut sehr dünn ist, fast gleichgekrümmte Flächen hat, und ihr Brechungsvermögen nur wenig das der wässrigen Feuchtigkeit übertrifft. Ich habe §. 9 bei den Gleichungen 12), 12a), 12b), nachgewiesen, dass man an jeder brechenden Fläche eine unendlich dünne Schicht von beliebigem Brechungsvermögen und gleichgekrümmten Flächen einschieben könne, ohne die Brechung zu verändern. Man denke sich somit vor der Hornhaut eine unendlich dünne Schicht wässriger Feuchtigkeit ausgebreitet, wie sich denn sogar in Wahrheit dort eine ähnliche Schicht befindet, nämlich die Schicht der die Hornhaut netzenden Thränen. Dann können wir nachher die Hornhaut selbst als eine uhrglasförmige Linse betrachten, welche auf beiden Seiten von dem gleichen Medium, wässriger Feuchtigkeit, umgeben ist. Eine solche Linse hat eine sehr grosse oder unendliche Brennweite, d. h. sie verändert den Gang der Lichtstrahlen nicht merklich. Daraus folgt, dass die Brechung der Lichtstrahlen in der Hornhaut fast dieselbe sein wird, als wenn die wässrige Flüssigkeit bis an die vordere Fläche der Hornhaut reichte. Diese Annahme ist daher bis jetzt auch fast immer bei der Berechnung des Ganges der Lichtstrahlen in der Hornhaut gemacht worden, und sie ist um so nothwendiger zu machen, da wir bisher zwar gute Messungen der äusseren Hornhautkrümmung, aber keine genügend zuverlässigen für die innere besitzen.

Sollte die bezeichnete Annahme streng gerechtfertigt sein, so müsste nach §. 9 Gleichung 13) sein

$$n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) d = 0,$$

wo n_1 das Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit, n_2 das der Hornhaut, d die Dicke, r_1 den Krümmungshalbmesser der vorderen, r_2 der hinteren Fläche

der Hornhaut bezeichnet. Diese Gleichung kann nun in der That auf die Hornhaut nicht wohl passen. Wenn wir sie schreiben;

$$(r_2 + d) - r_1 = \frac{n_1}{n_2} d,$$

so ist $(r_2 + d)$ der Abstand des Krümmungsmittelpunktes der hinteren Fläche vom Scheitel der vorderen, und die Gleichung würde aussagen, dass der Krümmungsmittelpunkt der hinteren Fläche hinter dem der vorderen liege. Dann müsste die Hornhaut von der Mitte nach dem Rande zu an Dicke abnehmen, während in der Regel das Umgekehrte der Fall ist. Die Hornhaut wird also den Folgerungen gemäss, welche am Ende des §. 9 für concavconvexe Linsen aus der Gleichung 13) gezogen sind, in der Regel als Linse in wässriger Feuchtigkeit aufgehängt eine negative, aber sehr grosse Brennweite haben.

Nehmen wir $r_1 = 8$ Mm., $r_2 = 7$ Mm., $d = 1$ Mm. und nach W. Krause $n_2 = 1{,}3507$, $n_1 = 1{,}3420$, so wird nach §. 9 Gleichung 13) die Brennweite der in wässriger Feuchtigkeit befindlichen Hornhaut gleich — 8,7 Meter, eine Grösse, welche wir im Verhältnisse zu den Dimensionen des Auges als unendlich gross betrachten können.

Dasselbe wurde bestätigt durch Versuche mit dem Ophthalmometer, mittels welches Instrumentes ich die Grösse eines Objects mass, welches sich hinter einem Glasgefässe mit parallelen Wänden befand. Brachte ich in das Wasser eine frische Hornhaut einer menschlichen Leiche, so dass ich das Object nur durch die Hornhaut erblickte, so war durch das Ophthalmometer keine Verkleinerung des Bildes zu entdecken. Diese war also so gering, dass die leichte Trübung des Bildes durch die eingeführte Hornhaut hinreichte, sie unwahrnehmbar zu machen.

Um berechnen oder schätzen zu können, um wie viel sich die wirkliche Brechung am Auge von derjenigen unterschiede, welche eintreten würde, wenn das Brechungsvermögen der Hornhaut wirklich dem der wässrigen Feuchtigkeit gleich wäre, wollen wir die optischen Constanten der Hornhaut nach der Formel §. 9 Nr. 12) bestimmen, und dabei setzen $n_1 = 1$, $n_3 - n$, $n_2 = n + \triangle n$, $r_1 = r$, $r_2 = r - \triangle r$, wobei wir die Grössen $\triangle n$, $\triangle r$ und die Dicke der Hornhaut d als sehr klein gegen n und r ansehen können. Wenn wir diese Bezeichnungen in §. 9 Gleichungen 12) einsetzen, und die höheren Dimensionen der kleinen Grössen vernachlässigen, erhalten wir die Brennweiten.

$$F_1 = \frac{1}{n} F_2 = \frac{r}{n-1} \left\{ 1 - \triangle n \cdot \frac{(n-1)\, a - n \triangle r}{n\,(n-1)\, r} \right\} \quad . \quad . \quad 1).$$

Der Unterschied der Brennweiten von dem Werthe $\frac{r}{n-1}$, den wir durch die Annahme $\triangle n = 0$ erhalten, ist eine kleine Grösse zweiter Dimension; ebenso die Entfernung x des ersten Hauptpunktes, von der vorderen Hornhautfläche nach vorn gerechnet,

$$x = \frac{d \cdot \triangle n}{n\,(n-1)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{ a}).$$

Die Entfernung der beiden Hauptpunkte von einander a wird sogar eine kleine Grösse dritter Dimension:

$$A = \frac{d^2 \triangle n}{n\, r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{ b})$$

Für die Berechnung der Bilder wird es daher genügen, nur eine Brechung an der vorderen Fläche der Hornhaut in Betracht zu ziehen, und dabei das Brechungsvermögen der Hornhaut gleich dem der wässrigen Feuchtigkeit zu setzen.

Der zweite Theil des optischen Systems des Auges besteht aus der Krystallinse. Vor dieser befindet sich die wässrige, hinter ihr die Glasfeuchtigkeit. Da

das Brechungsvermögen dieser beiden Stoffe nur äusserst geringe Unterschiede zeigt, so wollen wir diesen Unterschied vernachlässigen. In optischen Systemen, deren erstes und letztes Mittel identisch ist, fallen die Hauptpunkte mit den Knotenpunkten zusammen. Wir können also für die Krystallinse im Auge, wie bei den gewöhnlichen Glaslinsen unserer optischen Instrumente, beide Arten von Punkten identificiren. Die Krystallinse unterscheidet sich aber dadurch wesentlich von unseren Glaslinsen, dass die Dichtigkeit ihrer Substanz nicht constant ist, sondern von aussen nach innen zunimmt. Da wir das Gesetz dieser Zunahme nicht genau kennen, sind wir auch ausser Stande, den Gang der Lichtstrahlen durch die Linse vollständig zu berechnen, und den Ort ihrer Brennpunkte und Hauptpunkte genau zu bestimmen. Wir müssen uns begnügen, Grenzen für die Lage dieser Punkte zu finden. In dieser Beziehung lassen sich folgende Sätze aufstellen.

1) Die Brennweiten der Krystallinse sind kleiner, als sie sein würden, wenn ihre ganze Masse das Brechungsvermögen ihres Kerns hätte.

Um diesen wichtigen Satz zu beweisen, denken wir uns die Krystallinse nach ihrer natürlichen Schichtung zerlegt in den Kern, der eine fast kugelige biconvexe Linse von positiver Brennweite darstellt, und in die einzelnen ihn umschliessenden Schichten, deren zunächst der Augenaxe gelegene Theile concavconvexen Linsen entsprechen. Und zwar sind dies Linsen, die nach dem Rande zu dicker oder wenigstens nicht dünner werden, bei denen also $r_1 \geqq r_2 + d$ (s. Ende von §. 9), wenn wir mit r_1 den Radius der convexen, mit r_2 den der concaven Fläche, und mit d die Dicke der Linse bezeichnen. Nach §. 9 Gleichung 13) ist unter diesen Umständen die Brennweite negativ. Die Lage der Hauptpunkte h_1 und h_2 und Brennpunkt p_1 und p_2 solcher Linsen ist dargestellt in §. 9 *Fig.* 37.

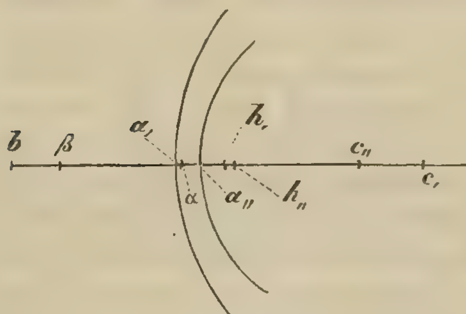


Fig. 40.

Es seien in *Fig.* 40. $a_{\prime}$ und $a_{\prime\prime}$ die Scheitelpunkte, $c_{\prime}$ und $c_{\prime\prime}$ die Mittelpunkte der beiden Grenzflächen, $h_{\prime}$ und $h_{\prime\prime}$ die Hauptpunkte einer solchen Linse. Von einem Objecte b, vor der ersten (convexen) Fläche befindlich, entwirft die Linse ein verkleinertes aufrechtes virtuelles Bild, wie in §. 9 gezeigt ist, und, können wir hier hinzusetzen, dies Bild β liegt nicht nur vor dem zweiten Hauptpunkte, sondern auch stets vor der zweiten Linsenfläche. Denn wenn das Object b von $h_{\prime}$ weiter entfernt ist als der Scheitel der ersten brechenden Fläche $a_{\prime}$, so muss sein Bild weiter von $h_{\prime\prime}$ entfernt sein als α, das Bild von $a_{\prime}$. Das Bild von $a_{\prime}$ wird aber nur durch eine Brechung an der Hinterfläche der Linse entworfen, und da die Brennweite dieser Fläche negativ ist, wird das Bild α von $a_{\prime}$ ihr näher und vor der Fläche liegen. Daher muss β, welches noch vor α liegt, jedenfalls vor der Hinterfläche der Linse liegen.

Es lässt sich ferner zeigen, dass das Bild β eines vor $a_{\prime}$ liegenden Objects b der hinteren Fläche der Linse desto näher rückt, je grösser das Brechungsvermögen der Linse. Zunächst ergiebt sich leicht, dass das Bild α von $a_{\prime}$ der hinteren Fläche der Linse desto näher rückt, je stärker das Brechungsvermögen. Wenn α das Bild von $a_{\prime}$ ist, und wir die Entfernung $\alpha a_{\prime\prime}$ mit q bezeichnen, so haben wir nach den Gleichungen §. 9 Nr. 3

$$\frac{n_2}{d} - \frac{n_1}{q} = \frac{n_1 - n_2}{r_2}$$

oder

$$q = \frac{n_1 r_2 d}{n_2 r_2 + (n_2 - n_1) d}.$$

Da der Nenner des Werthes von q grösser wird, wenn n_2 grösser wird, so wird q kleiner.

Wenn nun gezeigt werden kann, dass, wenn n_2 grösser wird, auch das Bild von b näher an α rückt, so folgt dann, dass unter dieser Bedingung das Bild von b sich auch der zweiten Fläche der Linse nähert.

Um dies zu zeigen, bezeichnen wir die Entfernung des Objects b vom ersten Hauptpunkte, also die Linie $b\,h_{,}$, mit $f_{,}$, die des Punktes $a_{,}$ von demselben Hauptpunkte, also die Linie $a_{,}\,h_{,}$, welche in den Gleichungen 13 a) des §. 9 der Länge $-h_{,}$ entspricht, mit p, die Brennweite der Linse mit F, so ist die Entfernung des Bildes β vom zweiten Hauptpunkte, oder die Länge

$$\beta\,h_2 = \frac{f_{,}\,F}{F - f_{,}}$$

und die Entfernung des Bildes α des Punktes $a_{,}$ von demselben Hauptpunkte

$$\alpha\,h_2 = \frac{p\,F}{F - p}$$

Die zweite Gleichung von der ersten subtrahirt, giebt die gesuchte Entfernung der beiden Bilder von einander:

$$\beta\,\alpha = \frac{(f_{,} - p)\,F^2}{(F - f_{,})\,(F - p)}$$

$$= \frac{f_{,} - p}{\left[\frac{F - p}{F} - \frac{f_{,} - p)}{F}\right]\frac{F - p}{F}}.$$

Wenn wir n_2 verändern, bleibt in diesem Ausdrucke $f_{,} - p$ unverändert. Setzen wir

$$C = \frac{F - p}{F}$$

und hierin für F und $p = -h_{,}$ aus den Gleichungen 13) und 13 a) §. 9 ihre Werthe, so erhalten wir

$$C = 1 + \left(1 - \frac{n_1}{n_2}\right)\frac{d}{r_2}.$$

Setzen wir ferner den absoluten Werth des in unserem Falle negativen F gleich P, also nach §. 9 13)

$$P = -F = \frac{n_1\,r_1\,r_2}{\left(1 - \frac{n_1}{n_2}\right)[n_2\,(r_1 - r_2 - d) + n_1\,d]}$$

so wird

$$\beta\,\alpha = \frac{(f_{,} - p)}{\left[C + \frac{f_{,} - p}{P}\right]C}.$$

Wenn wir nun n_2 grösser machen, wird C grösser, P kleiner, wie sich aus der Form, in der wir ihre Werthe geschrieben haben, leicht ergiebt, und $f_{,} - p$ bleibt ungeändert. Wenn C grösser wird, wird $\beta\,\alpha$ kleiner, und wenn P kleiner wird, wird $\beta\,\alpha$ ebenfalls kleiner. Folglich wird $\beta\,\alpha$ kleiner, und endlich auch $\beta\,a_2$ kleiner, wenn n_2 grösser wird.

Wir haben bisher die Eigenschaft einer einzelnen solchen Linse untersucht, wie sie durch Zerlegung des Krystallkörpers nach seinen Schichten entstehen würden.

Denken wir uns nun alle die concavconvexen Linsen, welche auf einer Seite des Kerns im Krystallkörper liegen, in wässrige Feuchtigkeit getaucht, und wieder in ihre natürliche Lage gebracht, oder denken wir uns, mit andern Worten, zwischen jede zwei Lagen ungleicher Dichtigkeit im Krystallkörper eine unendlich dünne Schicht wässriger Feuchtigkeit eingeschaltet, und den Theil derselben isolirt, welcher auf einer Seite des Kerns liegt, so erhalten wir ein optisches System, welches wir eine zusammengesetzte convexconcave Linse nennen können.

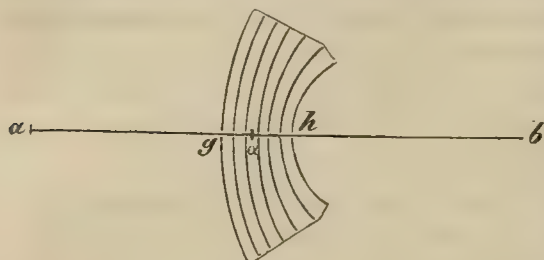


Fig. 41.

Es sei dies System in *Fig. 41* dargestellt; *a b* sei die Axe, *g* der Scheitel der äussersten convexen, *h* der concaven Fläche des Systems. Vor der convexen Seite des Systems liege ein leuchtender Punkt *a*. Nach dem, was wir in Bezug auf eine einzelne solche Linse bewiesen haben, folgt, dass die erste Linse ein Bild von *a* entwirft, welches vor ihrer zweiten Fläche, also auch vor der ersten Fläche der zweiten Linse liegt. Daraus folgt weiter, dass auch diese Linse und so jede folgende ein Bild von *a* entwirft, welches vor ihrer zweiten Fläche liegt. Das ganze System wird also ein Bild von *a* entwerfen, welches vor seiner letzen brechenden Fläche liegt, etwa in α.

Ferner ergiebt sich leicht, dass, wenn *a* näher nach *g* rückt, auch α sich dem Punkte *h* nähern muss. Denn einfache Linsen mit negativer Brennweite entwerfen von näheren reellen Objecten, welche vor ihnen liegen, auch nähere Bilder. Nähert sich also *a* der ersten Linse, so entwirft diese auch ein näheres Bild, welches wieder Object der zweiten Linse wird, und so fort.

Endlich ergiebt sich, dass, wenn wir das Brechungsvermögen einer der Schichten erhöhen, das Bild α näher an *h* fallen wird. Bis zu der veränderten Schicht hin bleibt der Gang der Lichtstrahlen und die Lage der Bilder unverändert, die Schicht mit erhöhtem Brechungsvermögen entwirft aber jetzt ein näheres Bild von *a*, welches ein näheres Object für die folgenden Schichten wird, und dem ein näher an *h* gelegenes letztes Bild α entsprechen muss.

Wenn also das Bild α dieselbe Lage behalten soll, während wir das Brechungsvermögen einer der Schichten erhöhen, müssen wir die Entfernung *a g* entsprechend vergrössern.

Die ganze Krystallinse können wir nur zusammengesetzt denken aus zwei solchen Systemen concavconvexer Linsen *B* und *C* und ihrem biconvexen Kerne *A*, wie in *Fig. 42*. Wenn die Krystallinse als Ganzes von einem vor ihr gelegenen Punkte *a* ein reelles umgekehrtes Bild in *b* entwirft, so wird das Schichtensystem *B* ein Bild α vor der vorderen Fläche des Kerns entwerfen müssen, und dem Bilde *b* wird ebenso ein Bild β hinter der hinteren Fläche des Kerns entsprechen müssen, welches die Strahlen nach der Brechung im Kerne und vor der Brechung im Systeme *C* bilden.

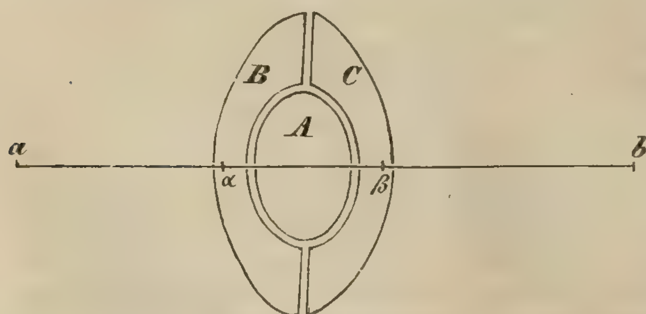


Fig. 42.

Der Kern muss also nach Art von biconvexen Linsen ein umgekehrtes Bildchen von α in β entwerfen. Er thut dies, wenn α vor seinem vorderen Brennpunkte liegt.

Rückt *a* in unendliche Entfernung, so wird *b* im hinteren Brennpunkte der ganzen Krystallinse liegen müssen.

Erhöhen wir nun das Brechungsvermögen einer der Schichten in B, so wird α näher an die Vorderfläche von A rücken, folglich das Bild β, welches A von α, und das Bild b, welches C von β entwirft, sich nach hinten entfernen.

Erhöhen wir ebenso das Brechungsvermögen einer der Schichten von C, so wird dem Bilde β, welches seinen Platz behält, ein entfernteres Bild b entsprechen.

Erhöhen wir also das Brechungsvermögen einzelner Schichten der Systeme B und C, so entfernt sich der hintere Brennpunkt der Krystallinse von ihrer hinteren Fläche.

Wir können das Brechungsvermögen sämmtlicher Schichten der Krystallinse bis zu dem des Kerns wachsen lassen, ohne dass der Brennpunkt in unendliche Entfernung hinausrückt, da ja schliesslich, wenn die Beschaffenheit aller Schichten der des Kerns gleich geworden ist, die Krystallinse eine einfache homogene biconvexe Linse darstellt, deren Brennweite positiv und endlich sein muss.

Was für den hinteren Brennpunkt der Linse gilt, gilt natürlich auch für den vorderen, und somit ist bewiesen, dass die Brennpunkte der Krystallinse ihr näher liegen, als sie es thun würden, wenn alle ihre Schichten die Dichtigkeit und das Brechungsvermögen des Kerns hätten.

2) Die Entfernung der Hauptpunkte von einander ist in der Krystallinse kleiner als in einer Linse, welche dieselbe Form und das Brechungsvermögen des Kerns hätte.

Die Hauptpunkte sind die von der Linse selbst entworfenen Bilder eines in ihr liegenden Punktes, nämlich ihres sogenannten optischen Mittelpunktes. Wo dieser auch liegen mag, so lässt sich in ganz ähnlicher Weise, wie es eben zur Bestimmung der Brennpunkte geschehen ist, nachweisen, dass die Bilder des optischen Mittelpunktes desto näher den Oberflächen der Linse rücken werden, je mehr das Brechungsvermögen der einzelnen Schichten der Krystallinse steigt, dass dabei also auch die Entfernung der beiden Bilder von einander algebraisch grösser wird. Wenn nun sämmtliche Schichten der Linse schliesslich das Brechungsvermögen des Kerns erreicht haben, wird im Allgemeinen der optische Mittelpunkt der Krystallinse nicht mehr mit dem optischen Mittelpunkte dieser neuen gleichartigen Linse zusammenfallen. Da aber bei einer Linse mit positiven Brennweiten die Entfernung der Hauptpunkte ein Maximum ist unter den Entfernungen zusammengehöriger Bilder, so ist die Entfernung der Hauptpunkte dieser neuen gleichartigen Linse jedenfalls grösser als die Entfernung der von ihr entworfenen Bilder des optischen Mittelpunktes der unveränderten Krystallinse, folglich auch grösser als die Entfernung der Hauptpunkte der unveränderten Krystallinse von einander.

Es lässt sich ferner nachweisen, dass die Entfernung der Hauptpunkte der Krystallinse einen positiven Werth hat, d. h. dass der zweite Hauptpunkt hinter dem ersten liegt, wenn wir annehmen, wie dies aus der Form der Linsenschichten hervorzugehen scheint, dass die Krümmungsradien der in der Axe gelegenen Theile der Schichtflächen grösser sind als die Entfernungen dieser Flächen vom Kerne der Linse. Brechende Kugelflächen entwerfen von Punkten, welche zwischen ihnen und ihrem Mittelpunkte liegen, Bilder, die der brechenden Fläche näher sind als das Object. Folglich wird das Bild des Mittelpunktes des Linsenkerns, welches die vordere Linsenhälfte entwirft, vor seinem Objecte, das, welches die hintere Linsenfläche entwirft, hinter seinem Objecte liegen. Die beiden zusammengehörigen Bilder des Mittelpunktes des Linsenkerns haben also eine positive Entfernung. Da der Abstand der Hauptpunkte algebraisch grösser ist als der aller anderen zusammengehörigen Bilder, so ist dieser Abstand jedenfalls positiv.

Die Hauptpunkte einer Linse, welche die Gestalt der menschlichen Krystallinse und das Brechungsvermögen ihres Kerns hätte, würden nur etwa $\frac{1}{4}$ Mm. von einander

entfernt sein; dadurch ist die Entfernung der Hauptpunkte der Krystallinse von einander also in sehr enge Grenzen eingeschlossen.

Die Brechungsverhältnisse der durchsichtigen Mittel des menschlichen Auges sind früher von CHOSSAT[1] und BREWSTER[2] bestimmt worden; neuerdings ist eine grosse Zahl solcher Messungen von W. KRAUSE[3] ausgeführt worden, während die erstgenannten Beobachter, wie es scheint, nur wenige Augen untersucht haben. BREWSTER brachte die zu untersuchende Substanz zwischen die krumme Fläche einer Convexlinse, welche als Objectiv eines Mikroskops diente, und ein gegen die Axe des Mikroskops senkrecht gestelltes Planglas. Dadurch wird die Brennweite des Mikroskops verändert. BREWSTER mass den Objectsabstand des Mikroskops vor und nach der Einbringung der brechenden Substanz und nach der Einbringung von reinem Wasser, dessen Brechungscoefficient bekannt war. CAHOURS und BECQUEREL[4] schlugen vor, die Grösse der Bilder des Mikroskops zu messen, und dieser Methode ist auch W. KRAUSE gefolgt. Ich lasse hier die Beschreibung des Verfahrens folgen, welches der Letztere angewendet hat.

Ein gewöhnliches KELLNER'sches Mikroskop, dessen unterer Theil auf *Taf. II. Fig. 3* abgebildet ist, wurde für die Messungen auf folgende Art eingerichtet. An die Stelle des Objectivs wurde eine biconvexe Linse von Crownglas von etwa 30 Mm. Brennweite gebracht, indem die Fassung *b* in das Rohr des Mikroskops *a* eingeschraubt wurde. Die Linse befand sich in einer concaven, geschwärzten Vertiefung, und wurde darin durch die Hülse *d*, die in der Mitte mit einer Oeffnung von 2,6 Mm. Durchmesser versehen war, festgeschraubt. Die Linse lag luftdicht auf dem Rande dieser Oeffnung an. Unter ihr wurde eine plane Glasplatte *e*, ebenfalls von Crownglas, angebracht, vermittelst eines Ringes *f*, dessen Innenraum konisch ausgeschliffen war und auf die Hülse *d*, die ebenfalls konisch zugeschliffen war, passte, jedoch nicht so genau, dass nicht Luft langsam dazwischen hindurchdringen konnte.

Das zu prüfende Augenmedium wurde in den Ring *f* auf die Mitte der ebenen Platte gebracht, und dann der Ring so fest auf die Hülse *d* aufgedrückt, dass die letztere auf den vorspringenden Rand *g* aufstiess, um dadurch das Planglass sicher vertical gegen die Axe des Mikroskops zu stellen. Nach jeder Messung konnte die Objectivlinse herausgenommen und gereinigt werden.

Im Oculare des Mikroskops war ein Glasmikrometer, getheilt in $\frac{1}{30}$ Wiener Linien, befestigt; auf den Objecttisch wurde ein eben solches, getheilt in $\frac{1}{10}$ Linien, gelegt, und das Mikroskop so gestellt, dass beide Theilungen gleichzeitig deutlich gesehen wurden, und bestimmt, wie viel Theilstrichen des oberen Mikrometers einer des unteren entsprach. Eben solche Messungen wurden angestellt, wenn bloss Luft zwischen der Objectivlinse und der ebenen Platte, und wenn destillirtes Wasser dazwischen war.

Zur Berechnung der Resultate können wir die Gleichungen §. 9. Nr. 12) benutzen; zwar beziehen sich diese nur auf zwei brechende Flächen und in dem Objectivsystem von KRAURE's Apparate haben wir vier, nämlich die erste und zweite Fläche des Planglases, die erste und zweite Fläche der biconvexen Linse. Wenn wir uns aber das System in zwei zerlegen, von denen das erste die beiden ebenen Flächen umfasst, das zweite die beiden Flächen der Linse, so sind die Brennweiten des ersten Systems unendlich. Bezeichnen wir die erste (untere) Brennweite des Planglases entsprechend der Bezeichnung in §. 9 Gleichung 11a) bis f) mit $f_{\prime}$, die zweite des Planglases mit $f_{\prime\prime}$, die erste (untere) der Linse mit $\varphi_{\prime}$, die zweite mit $\varphi_{\prime\prime}$, den Abstand des zweiten Hauptpunktes des Planglases vom ersten der Linse mit d, so giebt die letzte der Gleichungen 11 f), wenn wir $f_{\prime\prime}$ unendlich gross setzen, für die zweite (obere) Brennweite des ganzen Systems:

$$F_{\prime\prime} = \varphi_{\prime\prime}.$$

[1] *Bulletin des sc. par la Société philom. de Paris.* A. 1818. Juin. p. 294.
[2] *Edinburgh Philos. Journal.* 1819. No. 1. p. 47.
[3] Die Brechungsindices der durchsichtigen Medien des menschl. Auges von Dr. W. KRAUSE. Hannover 1855.
[4] *L'Institut Scienc. math., phys. et natur.* 1840. p. 399.

Die erste Brennweite des ganzen Systems ist dieser gleich, da das erste und letzte Mittel (Luft) identisch sind.

Für die Entfernung des zweiten Hauptpunktes des ganzen Systems vom zweiten Hauptpunkte der Linse giebt die Gleichung 11 e) den Werth 0, wenn wir $f_{//} = \infty$ setzen. Der zweite Hauptpunkt und zweite Brennpunkt sind also in diesem Falle dieselben, als wenn das zwischen der ebenen Platte und der Linse eingeschlossene Mittel nach vorn unbegrenzt wären.

Wir nennen also, entsprechend der Bezeichnung des §. 9 Gleichung 12), das Brechungsverhältniss der zu prüfenden Substanz n_1, das der Glaslinse n_2, das der Luft n_3 können wir $= 1$ setzen; dann entspricht der Werth von F_2 der genannten Gleichungen der Brennweite F unseres Objectivsystems:

$$F = \frac{n_2\, r_1\, r_2}{n_2\,(1 - n_2)\, r_1 + [n_2\, r_2 - (1 - n_2)\, d]\,(n_2 - n_1)}.$$

Nennen wir F_0 die Brennweite des Objectivsystems für den Fall, dass destillirtes Wasser zwischen die Platte und Linse eingebracht ist, n_0 das Brechungsvermögen des destillirten Wassers, und Φ die Brennweite für den Fall, wo sich Luft zwischen der Platte und Linse befindet, so erhalten wir noch zwei ähnliche Gleichungen, welche wir mit der vorigen in folgender Form schreiben können:

$$\left.\begin{aligned} F A - n_2\, r_1\, r_2 &= n_1\, F B \\ F_0 A - n_2\, r_1\, r_2 &= n_0\, F_0\, B \\ \Phi A - n_2\, r_1\, r_2 &= \Phi B \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2),$$

wenn wir der Abkürzung wegen setzen;

$$\begin{aligned} A &= n_2\,[(1 - n_2)\, r_1 + n_2\, r_2 - (1 - n_2)\, d] \\ B &= n_2\, r_2 - (1 - n_2)\, d. \end{aligned}$$

Wenn wir die zweite der Gleichungen 2) von der ersten, und die dritte von der zweiten abziehen, erhalten wir:

$$\begin{aligned} (F - F_0)\, A &= (n_1\, F - n_0\, F_0)\, B \\ (F_0 - \Phi)\, A &= (n_0\, F_0 - \Phi)\, B. \end{aligned}$$

Diese beiden Gleichungen durch einander dividirt geben:

$$\frac{F - F_0}{F_0 - \Phi} = \frac{n_1\, F - n_0\, F_0}{n_0\, F_0 - \Phi}.$$

Daraus folgt endlich:

$$n_1 = 1 + (n_0 - 1)\, \frac{F_0\,(F_1 - \Phi)}{F_1\,(F_0 - \Phi)} \quad \ldots\ldots \quad 2a).$$

Wir können also das Brechungsverhältniss der zu prüfenden Substanz n_1 berechnen, wenn wir das Brechungsverhältniss des destillirten Wassers n_0 kennen und die drei Brennweiten des Objectivsystems F, F_0 und Φ. Diese Brennweiten lassen sich aber aus der Messung der Bilder berechnen. Ist b die Grösse eines Theilstrichs des unteren Mikrometers, und β die absolute Grösse seines in der Ocularblendung des Mikroskops entworfenen Bildes, ohne Rücksicht auf seine umgekehrte Stellung, F die Brennweite des Objectivsystems und f_2 die Entfernung des Bildes β vom zweiten Hauptpunkte des Objectivsystems, so ist nach §. 9 Gleichung 8 b):

$$\frac{\beta}{b} = \frac{f_2 - F}{F} \text{ oder}$$

$$F = \frac{f_2\, b}{b + \beta} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2b)$$

Wenn man b und β gemessen hat, würde man also f_2 noch kennen müssen, um F zu finden. Vorausgesetzt aber, dass f_2 in allen Fällen dasselbe bleibt, was in Krause's Apparat mit grosser Annäherung der Fall ist, würde sich dessen Werth aus der Gleichung für n_1 fort-

heben, braucht also dann nicht gekannt zu sein. Lassen wir den drei Brennweiten F, F_0 und Φ entsprechen die drei Werthe β, β_0 und $\mathfrak{b}$, so wird der Werth von n_1

$$n_1 = 1 + (n_0 - 1)\frac{\mathfrak{b} - \beta}{\mathfrak{b} - \beta_0} \Bigg\} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2\,c).$$

Zur Berechnung von n_1 braucht man also unter diesen Umständen nicht einmal die Grösse des Objects b zu kennen, welches man unter das Mikroskop gelegt hat, sondern es genügt, irgend ein beliebiges Object zu nehmen, wenn es nur immer dasselbe bleibt.

Der Werth von f_2 ist in diesen Messungen constant, wenn sich die Stellung des Mikrometers im Oculare, und die des zweiten Hauptpunktes des Objectivsystems nicht ändert. Die letztere ist bei Einschaltung verschiedener Flüssigkeiten zwischen der ebenen Platte und Linse nur dann streng constant, wenn die obere Fläche der Linse eben ist. In §. 9 Gleichung 12a) ist h_2 die Entfernung des zweiten Hauptpunktes von der hinteren Fläche der Linse. Wenn r_2 nicht unendlich ist, ist diese Entfernung von n_1, dem Brechungsvermögen der eingeschalteten Substanz, abhängig. Wenn man r_2 unendlich gross setzt, nachdem man Zähler und Nenner des Ausdrucks für h_2 dadurch dividirt hat, wird

$$h_2 = -\frac{n_3\, d}{n_2},$$

also unabhängig von n_1. Es möchte daher besser sein, bei solchen Messungen statt der biconvexen eine planconvexe Linse zu nehmen, die plane Seite nach oben gewendet. Indessen ist der Fehler, welcher durch Anwendung einer biconvexen entstehen kann, jedenfalls äusserst unbedeutend, wenn nur die Dicke der Linse gegen die Länge des Körpers des Mikroskops vernachlässigt werden kann.

Brewster hat bei seinen Messungen den Brechungscoefficienten des destillirten Wassers = 1,3358 gesetzt, was nach Fraunhofer's Messungen etwa der Linie E im Grün, also den Strahlen mittlerer Brechbarkeit entsprechen würde. Krause zieht auf Listing's Rath vor, als Grundlage den intensivsten Strahl des Spectrums zu nehmen, welcher nach Fraunhofer den Brechungsindex 1,33424 hat. Ich gebe in der folgenden Tafel die Resultate, welche Chossat, Brewster und Krause für das menschliche Auge erhalten haben. W. Krause hat 20 Augen von 10 Individuen untersucht und sehr beträchtliche individuelle Abweichungen gefunden.

Tabelle der Brechungsindices menschlicher Augen.

Beobachter.		Hornhaut.	Wässrige Feuchtigkeit.	Glaskörper	Krystallinse. Aeussere Schicht.	Krystallinse. Mittlere Schicht.	Krystallinse. Kern.
Chossat.		1,33	1,338	1,339	1,338	1,395	1,420
Brewster. $n_0 = 1{,}3358$.			1,3366	1,3394	1,3767	1,3786	1,3839
W. Krause. $n_0 = 1{,}3442$.	Max.	1,3569	1,3557	1,3569	1,4743	1,4775	1,4807
	Min.	1,3431	1,3349	1,3361	1,3431	1,3523	1,4252
	Mittel.	1,3507	1,3420	1,3485	1,4053	1,4294	1,4541
Helmholtz. $n_0 = 1{,}3354$.			1,3365	1,3382	1,4189		

Die von mir selbst angestellten Messungen sind in folgender Weise ausgeführt: Es wurden Proben der zu untersuchenden Flüssigkeit zwischen einer ebenen Glasplatte und der concaven Fläche einer kleinen planconcaven Linse eingeschlossen; Bilder dieses optischen Systems wurden mit dem Ophthalmometer gemessen, daraus die Brennweiten berechnet. Ausserdem konnte der Radius der concaven Linsenfläche direct mit dem Ophthalmometer bestimmt werden, ähnlich wie dies in §. 2 für den Krümmungsradius der Hornhaut geschehen ist. Unter diesen Umständen war es nicht nöthig, auch mit destillirtem Wasser zwischen den Gläsern zu beobachten, und dessen Brechungsverhältniss als bekannt vorauszusetzen. Das Brechungsverhältniss

des destillirten Wassers fand sich auf diese Weise 1,3351, was zwischen BREWSTER's und KRAUSE's Zahl liegt.

KRAUSE hat noch eine Reihe von Brechungsverhältnissen an Kalbsaugen untersucht, namentlich in der Absicht, um zu ermitteln, ob die Brechungsverhältnisse in den ersten 24 Stunden nach dem Tode sich merklich verändern; indem er 20 solcher Augen unmittelbar nach dem Tode untersuchte, 20 andere, nachdem sie 24 Stunden bei 15° R. aufbewahrt worden waren. Er fand folgende Mittelzahlen:

	frische Augen	nach 24 Stunden
Hornhaut	1,3467	1,3480
Wässrige Feuchtigkeit	1,3421	1,3415
Glaskörper	1,3529	1,3528
Aeussere Linsenschicht	1,3983	1,4013
Mittlere Linsenschicht	1,4194	1,4211
Linsenkern	1,4520	1,4512.

Daraus geht hervor, dass sich die Brechungsverhältnisse der Kalbsaugen in den ersten 24 Stunden nach dem Tode nicht merklich verändern, und es lässt sich demnach dasselbe für die menschlichen annehmen.

Da aus der Gestalt und den Brechungsverhältnissen der einzelnen Schichten der Krystallinse deren Brennweite nicht unmittelbar zu berechnen ist, so will ich hier die Resultate von directen Messungen der optischen Constanten zweier menschlichen Linsen anführen, welche ich etwa 12 Stunden nach dem Tode untersuchen konnte.

An der Luft trocknet und faltet sich die Oberfläche einer aus dem Auge genommenen Linse sehr bald, in Wasser quillt sie auf und wird trübe. Ich habe deshalb die todten Linsen während ihrer Untersuchung mit Glasfeuchtigkeit umgeben. Ausserdem sind die Linsen ausserordentlich nachgiebig gegen jeden Zug und Druck; so lange sie aber von ihrer elastischen und sie sehr prall umschliessenden Kapsel umgeben sind, sind diese Formveränderungen vorübergehend. Man muss die Linsen während der Untersuchung also so lagern, dass sie keinem äusseren Zuge oder Drucke ausgesetzt sind. Ich that das auf folgende Weise. In *Fig. 43* ist ein Durchschnitt des kleinen Apparates, den ich dazu brauchte, in natürlicher Grösse dargestellt. In der Mitte befindet sich ein hohles cylindrisches Stück aus Messing, welches im Inneren bei *b b* eine horizontale, auf der oberen Seite concave und in der Mitte mit einer runden Oeffnung versehene Scheidewand hat. Ich benutzte dazu die Fassung eines der Objectivgläser eines älteren Mikroskops. Der untere Rand dieses Messingstücks wird auf die planparallele Glasplatte *c c* aufgekittet, aber so, dass sich keine Schicht Kitt von merklicher Dicke zwischen die unterste Rundung des Randes und die Glasplatte einschiebt. Nun füllt man erst den unteren Hohlraum des Messingcylinders mit Glasfeuchtigkeit, legt dann die Krystallinse, welche man vorsichtig und ohne Verletzung oder harte Berührung aus dem Auge genommen hat, mit ihrer platteren Seite auf das Diaphragma *b b*. Dann füllt man oben noch etwas Glasfeuchtigkeit nach, bis sie bis zum oberen Rande des Messinggefässes steht, und deckt die zweite planparallele Glasplatte *d d* darüber, so dass diese auch oben der Glasfeuchtigkeit eine gerade Oberfläche giebt. Da ich mein Ophthalmometer nicht bequem vertical stellen konnte, so setzte ich auf die Glasplatte *d d* noch ein rechtwinkeliges, gleichschenkeliges Glasprisma *f*, welches das von unten her durch die Linse kommende Licht horizontal reflectirte. Das Ganze setzt man dann bequem auf den Körper eines Mikroskops, von dem man alle Gläser und die enge Blendung am unteren Theile entfernt hat, und bringt eine Messingplatte mit GRAVESAND'schen Schneiden, deren Zwischenraum als optisches Object für die Krystallinse gebraucht werden soll, einmal auf den Objecttisch des Mikroskops, und dann wieder dicht unter die Glasplatte *c c*,

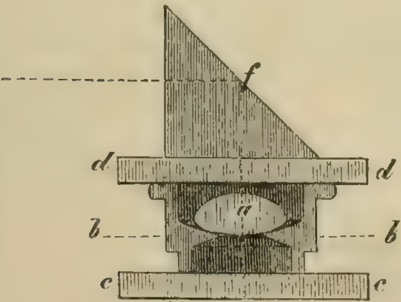


Fig. 43.

zwischen sie und den oberen Rand des Körpers des Mikroskops. Zur Beleuchtung gebraucht man den Spiegel des Mikroskops, indem man ihn von unten her Licht durch den zwischen den Schneiden gelegenen Ausschnitt der Messingplatte werfen lässt. Mittels des Ophthalmometers misst man nun die Grösse des Bildes, welches die Krystallinse von dem Ausschnitte der Messingplatte entwirft.

Zur Rechnung muss man die Entfernung des Ausschnitts zwischen den GRAVESAND'schen Schneiden von der unteren Fläche der Platte $c\,c$ kennen. Diese Grösse sei a_1, wenn der Schirm auf dem Tische des Mikroskops liegt, und a_2, wenn er dicht unter der Platte liegt. Je grösser man a_1 und je kleiner man a_2 machen kann, desto bessere Resultate giebt der Versuch. Ferner muss man die Dicke der Platte $c\,c$ kennen, welche wir c nennen wollen, und wenigstens annähernd ihr Brechungsvermögen n_c, endlich die Entfernung b zwischen der oberen Fläche der Platte $c\,c$ und dem oberen Rande der Oeffnung $b\,b$, und das Brechungsverhältniss des Glaskörpers gegen Luft n_2. Ferner sei b_1 die Entfernung der GRAVESAND'schen Schneiden von einander zu der Zeit, wo sie auf dem Tische des Mikroskops um a_1 entfernt von der Platte c lagen, β_1 die Breite des von der Krystallinse entworfenen Bildes, ihres Zwischenraums, welche in diesem Falle eine negative Grösse ist wegen der Umkehrung des Bildes, b_2 und β_2 die entsprechenden Grössen bei der anderen Lage des Schirms, f die gesuchte Brennweite der Linse in Glasfeuchtigkeit, und x der Abstand ihres ersten Knotenpunktes von der Ebene des oberen Randes der Oeffnung $b\,b$. So ergiebt sich aus dem, was über die Brechung in ebenen Platten §. 9 Gleichung 3e) und 6c) gefunden ist, dass die Lichtstrahlen wenn sie in der Glasfeuchtigkeit vor der Krystallinse angekommen sind, einem Bilde von der Grösse b_1 oder b_2 entsprechen, welches in der Entfernung beziehlich $\left(n\,a_1 + \frac{n}{n_c}\,c + b + x\right)$ oder $\left(n\,a_2 + \frac{n}{n_c}\,c + b + x\right)$ liegt. Die Grösse des Bildes β_1 oder β_2 wird nachher durch die Brechung an den ebenen Flächen der oberen Glasplatte nicht weiter verändert. Wir haben also die Gleichungen:

$$\frac{\beta_1 - b_1}{\beta_1} = \frac{n\,a_1 + \frac{n}{n_c}c + b + x}{f}$$

$$\frac{\beta_2 - b_2}{\beta_2} = \frac{n\,a_2 + \frac{n}{n_c}c + b + x}{f}$$

Durch Subtraction erhält man:

$$\frac{\beta_1 - b_1}{\beta_1} - \frac{\beta_2 - b_2}{\beta_2} = \frac{n\,(a_1 - a_2)}{f}$$

woraus f zu finden ist:

$$f = \frac{n\,\beta_1\,\beta_2\,(a_1 - a_2)}{b_2\,\beta_1 - b_1\,\beta_2},$$

und dann erhält man aus einer der beiden früheren Gleichungen auch x. Man vergesse bei der Rechnung nicht, dass β_1, wenn a_1 grösser als die Brennweite ist, ein umgekehrtes Bild, also negativ ist. Die Grösse x ist nicht unmittelbar gleich dem Abstande des Knotenpunktes von der vorderen Fläche der Linse zu setzen, sondern bedarf dazu noch einer kleinen Correction, weil die gekrümmte Fläche der Linse sich etwas unter die Ebene der Oeffnung, auf deren Rändern sie ruht, herabwölbt. Wenn man den Durchmesser der Oeffnung und den Krümmungsradius der Linse kennt, ist die Höhe des betreffenden Kugelabschnitts leicht zu berechnen.

Den Abstand des zweiten Knotenpunktes von der hinteren Fläche der Linse erhält man in derselben Weise, nachdem man die Linse umgekehrt hat.

Die kleine Grösse $\frac{c}{n_c}$ kann man durch Beobachtungen mit dem Ophthalmometer bestim-

men, indem die Glasplatte *cc*, ähnlich wie sie hier zwischen dem Spalt und der Krystalllinse angebracht ist, zwischen diesen und eine kleine Glaslinse von bekannter Brennweite und bekannter Lage der Knotenpunkte bringt. In ähnlicher Weise kann auch die Grösse *b* ermittelt werden. Dieselben Gleichungen, welche wir für die Ermittelung von x und f aufgestellt haben, können bei bekanntem x und f auch dienen, b oder $\frac{c}{nc}$ zu ermitteln.

Die Krümmungshalbmesser für die Scheitel der Linse können entweder, wie oben angegeben ist, durch Spiegelung ermittelt werden, oder auch durch Brechung. Zu dem Ende lässt man die Linse in ihrem Messinggehäuse liegen, und entfernt nur den Theil der Glasfeuchtigkeit, welcher ihre obere Fläche bedeckt, und stellt nun entweder den Ausschnitt zwischen den Gravesand'schen Schneiden vor dem Prisma *f*, etwas seitlich von der Gesichtslinie des Ophthalmometers auf, und misst die Grösse eines Spiegelbildes, oder man lässt den Messingschirm mit den Schneiden auf dem Objecttische des Mikroskops liegen, und misst das dioptrische Bild, welches jetzt entworfen wird. Wie die Messung des Spiegelbildchens zur Rechnung zu benutzen ist, ist schon oben angegeben. Für die dioptrische Messung mögen b_1, β_1 und f die bisherige Bedeutung behalten, β_3 die Grösse des Bildes bezeichnen, nachdem man die gläserne Feuchtigkeit von der oberen Fläche der Linse entfernt hat, und y der Abstand des oberen Knotenpunktes von der oberen Fläche sein. (Dieser Abstand bezieht sich immer auf den Fall, wo die Linse in Glasfeuchtigkeit liegt.) Endlich sei R der Krümmungsradius im Scheitel der oberen Fläche. Dann kann R aus der Gleichung gefunden werden:

$$R \cdot \frac{n(\beta_1 - \beta_3)}{(n-1)\beta_3} = f \cdot \frac{b_1 - \beta_1}{b_1} - y.$$

Ich habe für den eigenthümlichen Bau der Linse erwiesen, dass ihre Brennweite kürzer sei, als wenn sie ganz und gar die Dichtigkeit und das Brechungsvermögen ihres Kerns hätte. Wollte man also eine homogene Linse von gleicher Gestalt und Grösse und gleicher Brennweite, wie der Krystallkörper ist, herstellen, so würde man dieser ein noch höheres Brechungsvermögen geben müssen, als selbst sein Kern hat. Dieses Brechungsvermögen einer imaginären gleichgestalteten und gleichwerthigen homogenen Linse hat Senff das totale Brechungsvermögen genannt. Es ist wohl zu unterscheiden von dem mittleren Brechungsvermögen, welches dem arithmetischen Mittel sämmtlicher Schichten entspricht. Das totale ist im Gegentheile höher als das höchste Brechungsvermögen der dichtesten Theile der Linse. Ich gebe hier zunächst eine Zusammenstellung der von mir für menschliche Linsen gefundenen Werthe, die Lineardimensionen in Millimetern. Brennweite und Hauptpunkte beziehen sich auf den Fall, wo die Linse von Glasfeuchtigkeit umgeben ist. Die Krümmungshalbmesser sind durch Spiegelung bestimmt.

1) Brennweite	45,144	47,435
2) Abstand des ersten Hauptpunktes von der vorderen Fläche	2,258	2,810
3) Abstand des zweiten Hauptpunktes von der hinteren Fläche	1,546	1,499
4) Dicke der Linse	4,2	4,314
5) Krümmungshalbmesser im Scheitel der vorderen Fläche	10,162	8,865
6) Krümmungshalbmesser im Scheitel der hinteren Fläche	5,860	5,889
7) Totales Brechungsvermögen	1,4519	1,4414.

Ob aber Form und Brennweite todter Linsen denen des lebenden fernsehenden Auges gleich sind, ist mir durch Messungen, die ich an lebenden Augen ausgeführt habe, zweifelhaft geworden. Ich habe nämlich die Dicke der Linse an drei lebenden Personen zum Theil um mehr als ½ Mm. kleiner gefunden, als die kleinsten Werthe der Dicke sind, die man an todten Linsen findet[1]. Wie man die Entfernung der Pupille von der vorderen Hornhautfläche findet, ist in §. 3 beschrieben. Dicht am Pupillarrande der Iris befindet sich auch die vordere Linsenfläche. Um die Dicke der Linse zu bestimmen, muss man also noch die Entfernung der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut zu ermitteln suchen.

[1] v. Graefe's Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abth. 2. S. 56.

Es sei in *Fig.* 44 *A A* die Hornhaut, *B* die Linse. Es falle in der Richtung *C c* Licht in das Auge, werde gebrochen an der Hornhaut und vorderen Linsenfläche, dann an der hinteren Linsenfläche in *i* reflectirt. Der zurückgeworfene Strahl trete bei *d* aus der Hornhaut und gehe fort in der Richtung *d D*, wo er das Auge des Beobachters trifft. Jetzt bringe der Beobachter sein Auge nach *C* genau an die Stelle des Lichts und das Licht nach *D* genau an die frühere Stelle seines Auges, so wird ein Lichtstrahl wieder genau auf demselben Wege, nur in umgekehrter Richtung *D d i c C* vom Lichte zum Auge des Beobachters gehen, und es wird bei dieser zweiten Stellung wieder genau dieselbe Stelle der hinteren Linsenfläche das Licht zurückwerfen, wie bei der ersten. Indem man den Ort des Lichts und des Auges des Beobachters, den Ort des beobachteten Auges, so wie den Fixationspunkt des letzteren durch passende Abmessungen bestimmt, erhält man die Winkel, welche die Linien *C c*, *D d* und die Gesichtslinie des beobachteten Auges *G g* mit einander bilden. Um die Punkte *c* und *d* auf der Hornhaut zu finden, bringt man, wenn das Auge des Beobachters in *D* steht, ein kleines Licht entfernt vom Auge in *E* so an, dass für den Beobachter der von der Hornhaut entworfene Reflex dieses Lichts mit dem von der hinteren Linsenfläche entworfenen Reflexe des Lichts *C* zusammenfällt. Dies geschieht, wenn der Strahl *E d* nach *D* zurückgeworfen wird, wenn also die Halbirungslinie des Winkels *E d D* senkrecht auf der Hornhautfläche steht. Es sei *e d* diese Halbirungslinie. Hat man durch passende Abmessungen den Winkel *E d D* oder *E d G* bestimmt, so berechnet sich daraus leicht der Winkel, den *e d* mit *G g* bildet, und daraus, wenn man die Form und Krümmung der Hornhaut schon gemessen hat, die Länge des Hornhautbogens, der zwischen beiden liegt, oder die Lage des Punktes *d* auf der Hornhaut. Eben so wird die Lage des Punktes *c* bestimmt.

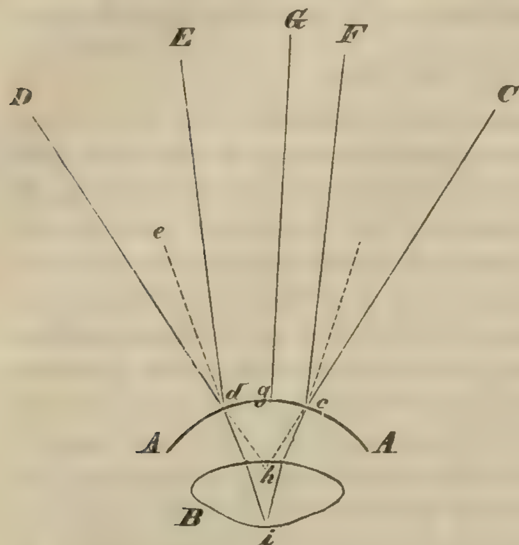


Fig. 44.

Jetzt kennt man also die Lage der Punkte *c* und *d*, die Richtung der Linien *C c* und *D d*; man verlängere beide, bis sie sich in *h* schneiden, so ist *h* der scheinbare Ort des spiegelnden Punktes der hinteren Linsenfläche, d. h. der Ort, wie er durch die Substanz der Linse und Hornhaut hin erscheint.

Zur Ausführung der Messung werden die Lichter *C* und *E*, von denen das erstere möglichst gross und hell, das zweite klein sein muss und durch ein blaues Glas zur besseren Unterscheidung seines Reflexes gefärbt werden kann, an einem vom beobachteten Auge mehrere Fuss entfernten horizontalen Maassstabe angebracht. Der Beobachter blickt durch ein kleines Fernrohr, dessen Objectivglas sich ebenfalls an dem Maassstabe befindet, um seinen Ort an diesem bestimmen zu können. Dieses Fernrohr wird dann mit dem Lichte *C* vertauscht[1].

Es ergab sich dabei für drei Augen übereinstimmend, dass der scheinbare Ort der hinteren Linsenfläche mehr vor dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut liegt. Wie viel dieser Ort durch die Brechung in der Hornhaut verschoben sei, können wir berechnen. Da kugelige brechende Flächen den scheinbaren Ort solcher Objecte, die ihrem Mittelpunkte nahe liegen, sehr wenig verändern, so haben individuelle Abweichungen in der brechenden Kraft der wässrigen Feuchtigkeit hier wenig Einfluss auf das Resultat der Rechnung. Eben so verhält es sich mit der scheinbaren Lagenveränderung des Orts der hinteren Linsenfläche durch die Linse selbst, da diese Fläche jedenfalls dem hinteren Hauptpunkte der Linse sehr nahe ist. Da meine Messungen an todten Linsen über die Distanz der Hauptpunkte nichts Sicheres ergeben

---

[1] Das Detail der Ausführung ist beschrieben in GRAEFE's Archiv. I. 2. p. 51.

hatten, weil sich bei dieser sehr kleinen Grösse die Fehler sämmtlicher übrigen Messungen zusammenhäufen, so entnahm ich die Correction, welche wegen der Brechung in der Linse nöthig ist, von LISTING's schematischem Auge. Durch die Brechung in der Linse erscheint deren hintere Fläche um etwas weniger, als der Abstand der Hauptpunkte der Linse beträgt, vorgerückt. Da nun, wie ich vorher bewiesen habe, der Abstand der Hauptpunkte in der natürlichen Linse kleiner ist, als in einer von derselben Form und homogener Substanz, deren Brechungsvermögen der des Kerns gleich ist, so ist die nach LISTING's Linse berechnete Correction etwas zu gross, und vergrössert im Resultate der Rechnung die Dicke der Linse um ein wenig.

Ich fand für die drei gemessenen Augen im Mittel zweier gut übereinstimmender Versuchsreihen:

	O. H.	B. P.	J. H.
Krümmungsradius der Hornhaut	7,338	7,646	8,154
Scheinbare Entfernung der hinteren Linsenfläche vom Scheitel der Hornhaut	6,775	7,003	6,658
Wahre Entfernung	7,172	7,232	7,141
Entfernung der Pupillarebene vom Scheitel der Hornhaut	4,024	3,597	3,739

Wenn man die Pupillarebene auch als Ort der vorderen Linsenfläche betrachtet, ergeben sich daraus folgende Werthe für die Dicke der Linse im lebenden fernsehenden Auge:

3,148 3,635 3,402.

Wenn man dazu auch noch eine Correction anbringt, wegen der Hervorwölbung der vorderen Linsenfläche vor dem Pupillarrande, und dem Pupillarrande selbst keine merkliche Dicke beilegt, erhält man die Werthe

3,414 3801 3,555.

Es sind zur Berechnung dieser Correction Werthe für die Pupillarweite und die Krümmung der vorderen Linsenfläche benutzt, welche an den betreffenden Augen selbst durch Messung erhalten werden. Auch diese letzten Werthe sind noch kleiner als die kleinsten Werthe der Dicke, welche man bisher an todten Linsen erhalten hat. Diese schwanken nach dem älteren KRAUSE zwischen 4 Mm. und 5,4 Mm.

Da der jüngere KRAUSE die Brechungsverhältnisse von Kalbslinsen unmittelbar nach dem Tode und 24 Stunden später merklich gleich gefunden hat, so ist es unwahrscheinlich, dass die Linse durch Aufnahme von Wasser sich verdicke. Dann müssten wir nämlich eine Abnahme des Brechungsvermögens erwarten. Dagegen erscheint es möglich, dass dieser Unterschied mit den Veränderungen der Linse beim Fern- und Nahesehen zusammenhängt, worauf wir unten in §. 12 noch zurückkommen werden.

Es bleibt noch übrig, auseinander zu setzen, in wie weit sich bis jetzt die optischen Cardinalpunkte des Auges bestimmen lassen. Ich werde mich dabei an LISTING's schematisches Auge anschliessen, welches jedenfalls von dem wahren Mittel nicht weit abweichen kann, wie dies auch durch meine eigenen Messungen zum Theil wieder bestätigt wird. Wenigstens, wo man bei physiologisch-optischen Berechnungen überhaupt Mittelwerthe gebrauchen muss und darf, und nicht die Werthe für das besondere individuelle Auge ermitteln kann, auf welches sich die Berechnungen beziehen, wird man in Betracht der sehr grossen individuellen Verschiedenheiten eben so gut die Werthe von LISTING's schematischem Auge gebrauchen können, als die wirklichen Mittelwerthe der menschlichen Augen, wenn man letztere auch kennte. Ich werde deshalb im Verlauf des Werkes LISTING's Constanten gebrauchen, wo es nöthig ist, will aber hier anführen, in welchem Sinne diese von dem wahren Mittel mir abzuweichen scheinen.

Den Radius der Hornhaut setzt LISTING gleich 8 Mm.; er scheint nach SENFF's und meinen Messungen meist etwas kleiner zu sein. Das Brechungsvermögen der Hornhaut ist nach W. KRAUSE im Durchschnitt etwas höher als der von LISTING nach BREWSTER angenommene Werth $\frac{103}{77} = 1{,}3379$. Durch beide Umstände werden die Brennweiten der Hornhaut bei

Listing wohl etwas grösser als das Mittel. Nennen wir r den Krümmungsradius der Hornhaut, und n das Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit, so ist die vordere Brennweite der Hornhaut nach §. 9 Gleichung 3 a) und 3 b):

$$F_1 = \frac{r}{n-1},$$

die hintere Brennweite derselben:

$$F_2 = \frac{nr}{n-1}.$$

Nach Listing's Annahmen wird:

$$F_1 = 23\frac{9}{13}, \quad F_2 = 31\frac{9}{13}.$$

Nehmen wir nach den Beobachtungen von Senff $r = 7{,}8$, was auch ungefähr mit dem Mittel meiner Beobachtungen stimmt, und nach W. Krause $n = 1{,}342$, so wird:

$$F_1 = 22{,}81, \quad F_2 = 30{,}61.$$

Listing giebt der Linse seines schematischen Auges das Brechungsverhältniss $\frac{16}{11}$, eine Dicke von 4 Mm. und Krümmungsradien von 10 und 6 Mm. Nach den Gleichungen §. 9. 13. 13 a und 13 b giebt dies für den Fall, wo die Linse in wässriger Feuchtigkeit liegt, die Brennweite 43,796 Mm., den Abstand der Hauptpunkte von einander 0,2461 Mm., den Abstand des vorderen Hauptpunktes von der vorderen Linsenfläche 2,3462, und den des hinteren von der hinteren Fläche 1,4077. Diese Annahmen stimmen sehr nahe überein mit den vorher angeführten Werthen, welche ich selbst an zwei Krystallinsen menschlicher Leichen durch directe Messung gefunden habe. Weiter sind mir keine directen Messungen der Brennweite an menschlichen Augen bekannt geworden. Dass es bisher unmöglich sei, aus der Form und den Brechungsindices der verschiedenen Linsenschichten die Brennweite zu berechnen, ist oben auseinandergesetzt, und namentlich geht aus dem über diese Brennweite aufgestellten Theoreme hervor, dass es unrichtig ist, die Krystallinse durch eine homogene Linse ersetzen zu wollen, welche die Form und das mittlere Brechungsvermögen derselben habe, wie das von den älteren Optikern meistens geschah, sondern dass im Gegentheile einer solchen Linie ein höheres Brechungsvermögen als das ihrer dichtesten Theile beigelegt werden müsse. Für die Linse eines Ochsen fand Senff[1] für dieses totale Brechungsvermögen 1,539, während Grenzschicht und Kerntheil die Werthe 1,374 und 1,453 ergaben. Die aus meinen Messungen folgenden Werthe des totalen Brechungsvermögens sind niedriger (1,4519 und 1,4414), und entsprechen etwa nur dem Mittel der Werthe, welche W. Krause für das Brechungsverhältniss des Kerns gefunden hat (Max. 1,4807, Min. 1,4252; Mittel 1,4541). Listing hat vor meinen und W. Krause's Untersuchungen damit sehr übereinstimmend $\frac{16}{11} = 1{,}4545$ gewählt.

Sollte sich der Unterschied zwischen todten und lebenden Linsen, den meine Messungen ergaben, als constant herausstellen, so würde Listing's schematisches Auge wahrscheinlich nur einem nahesehenden Auge entsprechen, und wir würden der Linse eines fernsehenden Auges eine grössere Brennweite und geringere Dicke beilegen müssen.

Die Entfernung der vorderen Linsenfläche von der vorderen Hornhautfläche hat Listing gleich 4 Mm. gesetzt, was dem von mir untersuchten kurzsichtigen Auge O. H. entspricht. Bei kurzsichtigen Augen pflegt überhaupt die vordere Augenkammer tiefer, die Iris flacher zu sein. Bei den übrigen beiden normalsichtigen Augen war die Entfernung geringer. Bei allen dreien lag die hintere Linsenfläche vor dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut. Ich vermuthe deshalb, dass bei normalsichtigen Augen die Linse im Allgemeinen etwas näher der Hornhaut liegt, als Listing angenommen hat. Jedenfalls würde aber auch der Einfluss dieser Abweichung sehr gering sein.

---

[1] Volkmann Artikel Sehen in R. Wagner's Handwörterbuch d. Physiologie. Bd. III. S. 290.

Wenn die Brennweiten der Hornhaut, die Lage der Hauptpunkte und die Brennweite der Linse gegeben sind, sind die Cardinalpunkte des ganzen Auges nach §. 9. Gleichung 11 a) bis 11 f) zu finden. Die Werthe, welche Listing aus seinen Augen berechnet hat, sind schon oben angegeben.

Von den Cardinalpunkten der Linse am wichtigsten für die Bestimmung der Lage der Bilder auf der Netzhaut sind uns die Knotenpunkte des Auges. Glücklicher Weise kann deren Lage jetzt nicht mehr vielem Zweifel unterworfen sein.

Derjenige Punkt, dessen Bilder die beiden Knotenpunkte sind, liegt nach den in §. 9 angegebenen Methoden zur Auffindung dieser Punkte zwischen dem Knotenpunkte der Hornhaut, d. h. ihrem Krümmungsmittelpunkte und dem ersten Hauptpunkte der Linse, und seine Abstände von diesen beiden Punkten verhalten sich wie die kleinere Brennweite der Hornhaut zu der der Linse, also nahe wie 1 zu 2. In Listing's schematischem Auge beträgt der Abstand des vorderen Hauptpunktes der Linse vom Mittelpunkte der Hornhaut, der bei ihm in die hintere Linsenfläche fällt, 1,627 Mm., nach meinen Messungen an lebenden Augen kann die hintere Linsenfläche bis zu 1 Mm. vor dem Mittelpunkte der Hornhaut liegen; jene Entfernung würde also bis etwa 2,6 steigen können. Der Punkt also, dessen Bilder die beiden Knotenpunkte sind, würde 0,54 bis 0,87 Mm. vor dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut liegen, ein, wie man sieht, sehr enges Intervall für seine Lage. Der erste Knotenpunkt ist sein durch die Hornhaut entworfenes Bild. Bilder von Objecten, die sehr nahe vor dem Krümmungsmittelpunkte einer kugeligen brechenden Fläche liegen, liegen sehr wenig vor ihrem Objecte. Nehmen wir Listing's Werthe für die Brennweiten der Hornhaut und Linse, so liegt bei seinen Annahmen der vordere Knotenpunkt 0,758 Mm. vor dem Mittelpunkte der Hornhaut. Wenn dagegen der Punkt, dessen Bild er ist, 0,87 Mm. vor dem Mittelpunkte der Hornhaut läge, würde der erste Knotenpunkt etwa 1,16 Mm. vor diesem liegen.

Wir werden daher schwerlich fehlen, wenn wir annehmen, dass in normalen Augen der vordere Knotenpunkt $^3/_4$ bis $^5/_4$ Mm. vor dem Mittelpunkte der Hornhaut liegt.

Zu erwähnen ist hier noch ein Versuch von Volkmann [1], auf experimentellem Wege am menschlichen Auge die Lage der Knotenpunkte zu finden. Ich habe oben erwähnt, dass, wenn die Strahlen eines Lichts von der äusseren Seite her in das Auge fallen, das Flammenbildchen namentlich bei blonden Personen im inneren Augenwinkel sichtbar werden kann. Er mass den Abstand dieses Bildes von der Hornhaut, während zugleich die Richtung der einfallenden Strahlen und der Gesichtslinie passend bestimmt wurde. Er zeichnete dann den horizontalen Querschnitt des menschlichen Auges, bestimmte in der Zeichnung den Punkt, wo das Netzhautbild durch die Sclerotica erschienen war, und legte durch diesen Punkt eine Linie, welche die Augenaxe unter demselben Winkel schnitt, welchen die einfallenden Strahlen mit der Gesichtslinie gebildet hatten. Den Durchschnittspunkt sah er als Knotenpunkt an. Er findet im Mittel von fünf Personen, dass die Knotenpunkte 3''',97 (8,93 Mm.) hinter der Hornhaut liegen. Jedenfalls ist dieser Werth etwas zu gross, weil die Knotenpunkte nach dieser Bestimmung hinter dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut liegen würden, während sie nothwendig vor ihm liegen müssen. Die Abweichung in Volkmann's Resultate erklärt sich einmal daraus, dass er den Unterschied zwischen Augenaxe und Gesichtslinie noch nicht kannte, und daraus, dass die Lichtstrahlen bei diesem Versuche die brechenden Flächen des Auges unter sehr grossen Einfallswinkeln treffen, und die auf die Knotenpunkte und Hauptpunkte bezüglichen Sätze streng genommen nur für nahe senkrechte Incidenz gelten. Auch Burow [2] bemerkte deshalb bei der Wiederholung von Volkmann's Versuchen über den Knotenpunkt in weissen Kaninchenaugen, dass bei sehr schiefen Incidenzen die Netzhautbilder der Augenaxe näher fallen, als sie es sollten, wenn alle Richtungslinien sich in einem Punkte schnitten. Beide Ursachen müssen dazu beitragen, bei Volkmann's Versuch den Abstand des Knotenpunktes von der Hornhaut etwas grösser erscheinen zu lassen, als er wirklich ist.

---

[1] R. Wagner's Handwörterbuch d. Physiologie. Art. Sehen. S. 286*.
[2] Beiträge zur Physiologie d. menschl. Auges. S. 56–60.

Endlich will ich hier noch beschreiben, wie man die Centrirung des Auges, die Lage der Augenaxe und der Gesichtslinie untersuchen kann. Es dienen dazu die Spiegelbilder, welche die Hornhaut und die beiden Linsenflächen von einem vor dem Auge befindlichen hellen Lichte entwerfen.

Ueber das Aussehen dieser Spiegelbilder, und die Art, sie am besten zu beobachten, s. §. 12. Es sei in *Fig. 45* *c d* die Axe eines genau centrirten Auges, bei *a* das Auge des Beobachters, bei *b* ein Licht, es sei *c c* = *a b* und *a c* senkrecht auf *c d*. Unter diesen Umständen würden, wie leicht ersichtlich ist, die in der Axe gelegenen Scheitel der drei reflectirenden Flächen, der Hornhaut, der vorderen und hinteren Linsenfläche, Licht, welches von *b* auf sie fällt, von *b* nach *a* reflectiren, da alles auf beiden Seiten symmetrisch sein soll, und wenn das Auge und Licht ihren Platz tauschten, würde dasselbe wieder der Fall sein müssen, und dabei würden die drei reflectirenden Punkte in derselben perspectivischen Stellung zu einander bleiben. Namentlich würde in beiden Stellungen der Reflex von der vorderen Linsenfläche etwa in der Mitte zwischen den beiden anderen erscheinen müssen, da der scheinbare (durch die Hornhaut gesehene) Ort der vorderen Linsenfläche etwa in der Mitte zwischen der Hornhaut und dem scheinbaren Orte der hinteren Linsenfläche sich befindet.

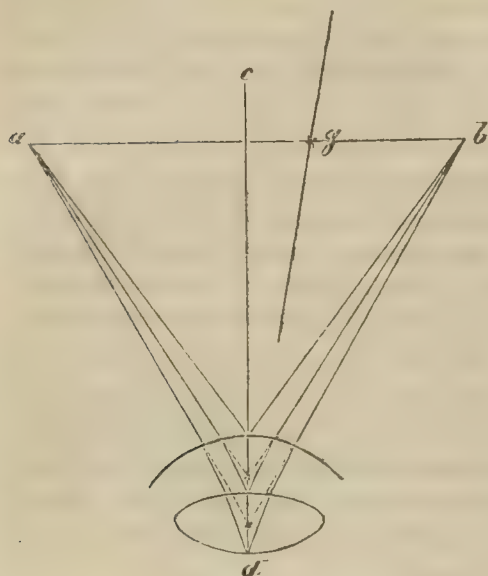


Fig. 45.

Die Untersuchung des Auges in dieser Weise ist nun leicht auszuführen. Es sei *a b* ein horizontaler Maassstab, an dessen Enden passende Oeffnungen für das Auge und das Licht angebracht sind. Dem untersuchten Auge *d* werde ein Platz in der Linie *c d* angewiesen, welche auf der Mitte von *a b* senkrecht steht, und man gebe ihm einen Fixationspunkt an einem beweglichen Körper *g*, den man so lange verschiebt nach oben und unten, nach rechts und links, bis der Beobacher den Reflex der vorderen Linsenfläche zwischen dem der Hornhaut und dem der hinteren Linsenfläche erblickt. Dann vertausche er den Ort des Lichts und seines Auges, und versuche, ob er bei derselben Stellung des Fixationspunktes auch von der anderen Seite her die drei Reflexe in der angegebenen Stellung erblicken kann. Ist das beobachtete Auge richtig centrirt, so muss es offenbar möglich sein, eine Stellung des Fixationspunktes zu finden, welche die angegebene Forderung erfüllt.

Ich habe noch kein menschliches Auge gefunden, welches dem entsprochen hätte. Wenn von der einen Seite gesehen die drei Reflexe die richtige Stellung hatten, war dies nicht mehr der Fall von der anderen Seite her; man musste dann das Fixationszeichen mehr oder weniger verschieben, um die richtige Stellung wieder hervorzubringen.

Bei den drei Augen, für welche ich das System von Messungen angestellt habe, musste der Fixationspunkt sich immer etwas oberhalb der Ebene *a b d* befinden. Die Gesichtslinie lag immer auf der Nasenseite der Linie *c d*. Ihre horizontale Projection bildete mit der Linie *c d* unter den angegebenen Umständen folgende Winkel:

Auge.	Licht kommt	
	von der Nasenseite.	von der Schläfenseite.
O. H.	3° 47′	4° 57′
B. P.	5° 6′	8° 12′
J. H.	5° 43′	7° 44′

Daraus folgt, dass das menschliche Auge nicht genau centrirt sei. Da jedoch die Unterschiede der zusammengehörigen Winkel verhältnissmässig klein sind, so erfüllt die Linie

c d für die in den Versuchen gefundenen Stellungen der beobachteten Augen wenigstens annähernd die Ansprüche, die man an eine Augenaxe zu machen hat, und man mag als Winkel zwischen der horizontalen Projection der Gesichtslinie und der Linie, welchen einer Augenaxe am besten entspricht, das arithmetische Mittel aus den angeführten Winkeln nehmen. Diese Linie fällt nach meinen Untersuchungen auch nahe genug mit der Hornhautaxe zusammen, und geht durch den Mittelpunkt des Hornhautumfangs.

Derjenige, welcher zuerst eine klare Vorstellung von der Brechung der Strahlen im Auge und von der Entstehung und Lage des Netzhautbildchens gehabt hat, ist KEPLER. Vor ihm hatte allerdings schon MAUROLYCUS die Krystallinse des Auges mit einer Glaslinse verglichen, und behauptet, dass sie die Strahlen nach der Axe hin breche, aber er läugnete, dass auf der Netzhaut ein umgekehrtes Bild entworfen werde, weil wir ja sonst Alles verkehrt sehen müssten. Auch PORTA, der Erfinder der *Camera obscura*, verglich das Auge mit einer solchen, meinte aber, dass die Bilder auf der Krystallinse entworfen würden. Erst KEPLER, der überhaupt die Grundsätze der Theorie der optischen Instrumente aufgefunden hat, lässt auf der Netzhaut ein umgekehrtes optisches Bild entstehen, und stellt als Bedingung des deutlichen Sehens hin, dass die Strahlen eines leuchtenden Punktes auf einen Punkt der Netzhaut vereinigt werden. KEPLER's Theorie wurde noch weiter ausgeführt durch den berühmten Jesuiten SCHEINER [1], der den Bau des Auges, die Brechung in den Feuchtigkeiten weiter untersuchte. Er bewies, dass die optischen Bilder auf der Netzhaut entworfen werden, indem er an Augen von Thieren die Netzhaut hinten frei legte. An einem menschlichen Auge stellte er diesen Versuch 1625 zu Rom an. Die brechende Kraft der wässrigen Flüssigkeit setzt er der des Wassers gleich, die Linse dem Glase, den Glaskörper zwischen beide. HUYGENS [2] endlich verfertigte eine künstliche Nachbildung des Auges, an der er die wesentlichsten Vorgänge des Sehens, den Nutzen der Brillen u. s. w auseinandersetzte.

Die Theorie KEPLER's behielt von nun an ziemlich allgemeine Anerkennung, wenn auch noch einzelne Liebhaber paradoxer Theorien sich in Widersprüchen dagegen gefielen. So N. TH. MÜHLBACH [3] und GAMPBELL [4], welche die Existenz des Netzhautbildchens läugnen, LEHOT [5], der im Glaskörper ein räumliches Bild der Gegenstände entstehen lässt. PLAGGE [6] lässt das Auge wie einen Spiegel wirken, und hält das durch Spiegelung auf der Hornhaut entstehende Bildchen für das Object des Sehens. J. READE [7] stimmt ihm bei und lässt es durch die Nerven der Hornhaut empfinden. MAYER [8] widerlegt die Ansicht von PLAGGE, stellt aber eine eben so wunderliche auf, dass die Netzhaut als Hohlspiegel wirke. Eben so lässt ANDREW HORN [9] das Bild gegen den Glaskörper reflectiren und von hier aus auf den Sehnerven wirken.

Was die Lage der optischen Cardinalpunkte betrifft, so erhob sich zunächst eine Schwierigkeit für den hinteren Brennpunkt, weil nach der Rechnung, die auf die gemessenen Dimensionen und Brechungsverhältnisse des Auges gestützt war, dieser Punkt hinter die Netzhaut zu fallen schien. Der Grund davon lag darin, dass man für die Krystallinse das mittlere Brechungsverhältniss ihrer einzelnen Schichten wählen zu müssen glaubte [10]. VALLÉE [11] glaubte deshalb annehmen zu müssen, dass das Brechungsverhältniss des Glaskörpers von vorn nach hinten zunehme. PAPPENHEIM [12] will wirklich solche, wenn auch sehr kleine Unterschiede durch den Versuch gefunden haben. Ueber die Lage der Knotenpunkte des Auges herrschte vor den theoretischen Arbeiten von GAUSS einige Verwirrung unter Physikern und Physiologen, weil die Theorie der optischen Instrumente bis dahin sich ausschliesslich mit Systemen brechender Flächen beschäftigt hatte, deren Entfernung von einander vernachlässigt werden konnte, wie das z. B. bei den Objectivgläsern der Fernröhre der Fall war. Im Auge ist die

---

[1] Oculus. Insprück 1619.
[2] Dioptrica in Opera posthuma. Lugduni 1704. p. 112.
[3] Inquisitio de visus sensu. Vindob. 1816.
[4] *Annals of philosophy*. X. 17. — Deutsches Archiv. IV. 110.
[5] *Nouvelle Théorie de la Vision*. Paris 1825.
[6] HECKER's Annalen. 1830. S. 404.
[7] *Annals of philos.* XV. 260.
[8] MUNCKE Art. Gesicht in GEHLER's Wörterbuch. Das dortige Citat ist falsch.
[9] *The seat of vision determined*. London 1813.
[10] MOSER in DOVE's Repertorium. V. 337—349*. — FORBES *Proc. Edinb. Roy. Soc.* 1849. Decb. p. 251.
[11] Comptes rendus. 1845. XIV. 481.
[12] Ibid. XXV. 901.

Entfernung der brechenden Flächen von einander im Vergleich zur Brennweite des ganzen Systems aber ziemlich beträchtlich, und wegen der mangelnden Ausbildung der Theorie wusste man sich die Fragen, auf die es ankam, nicht scharf zu stellen. Man suchte lange nach dem Punkte, der im Auge dem optischen Mittelpunkte der Glaslinsen entspräche und dadurch charakterisirt würde, dass der durch ihn gegangene Strahl ungebrochen durch die Augenmedien ginge. Wenn wir uns beide Knotenpunkte in einen zusammenzuziehen erlauben, so würde dieser dem gesuchten Punkte entsprechen. Man verwechselte namentlich auch diesen Punkt mit demjenigen Punkte, in welchem sich Linien schneiden, welche durch die im Gesichtsfelde sich deckenden Punkte verschieden entfernter Gegenstände gelegt sind. Der letztere, den wir Kreuzungspunkt der Visirlinien nennen wollen, ist, wie wir im nächsten Paragraphen zeigen werden, der Mittelpunkt des von der Hornhaut entworfenen Bildes der Pupille, und wesentlich vom Knotenpunkte verschieden. Muncke [1] identificirt beide Punkte und verlegt sie in die Mitte der Linse, Bartels [2] dagegen in das Centrum der Hornhaut. Volkmann [3] nennt den Punkt, wo sich Linien, die von einzelnen Punkten der Netzhautbilder nach den entsprechenden Punkten des Objects gezogen werden, schneiden, Kreuzungspunkt der Richtungsstrahlen, später, nach Mile's Einwendungen, der Richtungslinien. Er zeigt experimentell an Augen weisser Kaninchen, dass wirklich alle Richtungslinien in einem Punkte sich schneiden, und bestimmt die Lage dieses Punktes, welcher zwischen beide Knotenpunkte fallen muss, für das Kaninchenauge. Er findet, dass derselbe hinter die Linse fällt. Er versuchte denselben Punkt nach einer anderen Methode am lebenden menschlichen Auge zu finden. Zwei 6 Zoll vom Auge entfernte Haarvisire werden durch zwei dem Auge nähere Diopter betrachtet, und letztere so eingestellt, dass die Haare gleichzeitig in der Mitte der Diopteröffnungen erscheinen. Jedes Haar mit der zugehörigen Diopteröffnung, durch eine gerade Linie verbunden, giebt eine Visirlinie. Volkmann würde also den Kreuzungspunkt der Visirlinien im Auge haben finden können, wenn die von ihm beobachteten Personen im Stande gewesen wären, gleichzeitig und ohne Bewegung des Auges beide Haare in ihren Diopteren zu sehen. Dies ist aber ausserordentlich schwer, weil man dann nur eines direct sehen kann, und das andere durch indirectes Sehen auf den Seitentheilen der Netzhaut erkennen muss. Die Experimentirenden haben deshalb ohne Zweifel die beiden Diopter nach einander direct betrachtet, und ihre Visirlinien schnitten sich im Drehungspunkte des Auges, den Volkmann demzufolge für identisch mit dem Kreuzungspunkte der Richtungslinien erklärte.

Mile [4], Knochenhauer [5] und Stamm [6] stritten gegen Volkmann's Folgerungen. Ersterer zeigte, dass Richtungslinien und Visirlinien nicht nothwendig identisch seien, und erklärte den Mittelpunkt der Hornhaut für den Kreuzungspunkt der Richtungslinien, weil er die Brechung in der Linse glaubte vernachlässigen zu dürfen. Daraus folgert er denn, dass die Richtungslinien, nicht nothwendig durch die Mitte eines Zerstreuungskreises zu gehen brauchen, welcher im Auge von einem nicht deutlich gesehenen Objecte entworfen wird. Knochenhauer suchte Mile's Beweis, dass das Decken der Bilder im Gesichtsfelde unabhängig sei von den Richtungslinien zu vereinfachen, und vermeidet dabei Mile's bei dem damaligen Stande der theoretischen Kenntnisse allerdings bedenkliche und in der That nur annähernd richtige Voraussetzung, dass der Kreuzungspunkt der Richtungslinien für verschiedene Objectabstände gleich sei. Auch Burow [7] widerlegte Volkmann's Folgerungen, benutzte dessen Methode, um den Drehpunkt des Auges zu bestimmen, und schlug einen neuen Weg ein, den Kreuzungspunkt der Richtungslinien zu bestimmen, der aber aus einem von Listing später aufgedeckten Grunde auch nicht zum Ziele führte.

Moser [8] war der Erste, der die theoretischen Arbeiten von Gauss [9] und Bessel [10] auf das Auge anwendete, und aus den bis dahin ausgeführten Bestimmungen der Form der brechenden Flächen und der Brechungsverhältnisse die Lage der beiden Knotenpunkte, die er übrigens Hauptpunkte nennt, berechnete. Die Werthe, welche er für die Entfernung dieser Punkte von der Hornhaut fand, waren 3,19 und 3,276 Par. Lin. (7,18 und 7,37 Mm.). Da er aber als Brechungsverhältniss der Krystallinse Brewster's Mittelwerth 1,3839 angenommen

---

[1] Gehler's physik. Wörterbuch neu bearb. Leipzig 1828. Art. Gesicht. Bd. IV. 2. S. 1434*.
[2] Beiträge zur Physiol. d. Gesichtssinns. Berlin 1834. S. 61.
[3] Neue Beiträge zur Physiol. des Gesichtssinns. Leipzig 1836. Kap. IV. — Poggendorff's Ann. XXXVII. 342.
[4] Poggendorff's Ann. XLII. 37—71. 235—263*. Dagegen Volkmann ibid. XLV. 207—226*.
[5] Ibid. XLVI. 248—258*.
[6] Ibid. LVII. 346—382*.
[7] Beiträge zur Physiologie u. Physik d. menschl. Auges. Berlin 1841. S. 26-93.
[8] Dove Repertorium der Physik. V. 337 u. 373.
[9] Dioptrische Untersuchungen, Göttingen 1841.
[10] Astronomische Nachrichten. XVIII. Nr. 415.

hatte, und die Strahlen ferner Lichtpunkte sich dabei erst hinter der Netzhaut vereinigten, glaubte er den Radius der Hornhaut verkleinern zu müssen von 3''',39 auf 2''',88, und berechnete danach noch andere Werthe für den Abstand der Knotenpunkte von der Hornhaut, nämlich 2''',835 und 2''',890 (6,38 und 6,50 Mm.).

Listing [1] erörterte die Eigenschaften der Haupt- und Knotenpunkte (welchen letzteren er den Namen gab) in ihrer Beziehung zum Auge, gab angenäherte Werthe für ihre Lage, und hob namentlich hervor, dass der Brechungscoefficient der Linse, wenn man diese sich homogen denke, höher gesetzt werden müsse als der ihres dichtesten Theils. Volkmann [2] machte dann noch den schon oben erwähnten Versuch, die Lage der Knotenpunkte im lebenden menschlichen Auge experimentell zu bestimmen. Endlich gab Listing [2] neben einer vollständigen mathematischen Theorie eine Berechnung der Zahlenwerthe nach den besten bis dahin ausgeführten Messungen.

1575. Fr. Maurolyci Photismi de lumine et umbra ad Perspectivam et radiorum incidentiam facientes Venetiis 1575. Messinae 1613. — Eine spätere Gesammtausgabe seiner optischen Abhandlungen führt den Titel: Fr. Maurolyci, Abbatis Messanensis, theoremata de lumine et umbra, ad Perspectivam et radiorum incidentiam facientia; Diaphanorum partes seu libri tres, in quorum primo de perspicuis corporibus, in secundo de Iride, in tertio de organi visualis structura et conspicillorum formis agitur: Problemata ad Perspectivam et Iridem pertinentia. His accesserunt Christoph. Clavii e. S. J. notae. Lugduni 1613.

1583. Jo. Bapt. Portae Neap. de refractione Optices parte libri novem. Neapoli 1583. Liber III—VIII.

1602. *Jo. Kepler ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur. Francofurti 1604. Cap. V.

1611. Kepler Dioptrice, seu demonstratio eorum, quae visui et visibilibus, propter conspicilla non ita pridem inventa, accidunt. Augustae Vindelicorum 1611.

1619. C. Scheiner Oculus, sive fundamentum opticum. Innspruck 1619. London 1652.

1695. Huygens († 1695) Opera posthuma. Dioptrica. Lugduni 1704. p. 112.

1759. W. Porterfield *a treatise on the eye.* Edinb. 1759. Vol. I. Book 3. Chapt. 2*.

1776. J. Priestley's Geschichte der Optik; übers. von G. S. Kluegel. Leipzig 1776 (Aeltere Geschichte; Berechnung der Brennweite S. 465)*.
Rumball *Annals of Philos.* II. 376.

1813. Andrew Horn *the seat of vision determined.* London 1813.

1816. N. Th. Mühlbach Inquisitio de visus sensu. Vindobonae 1816.
Magendie *Précis élémentaire de Physiologie.* Paris. Vol. I. p. 59.

1817. Campbell *Annals of Philos.* X. 17.
Deutsches Archiv. IV. 110.
J. Read *Annals of Philos.* XV. 260.

1825. C. J. Lehot *Nouvelle Théorie de Vision.* Paris 1825.

1828. G. R. Treviranus Beiträge zur Anatomie und Physiologie der Sinneswerkzeuge. Bremen 1828. Kap. I*.
Muncke in Gehler's physikalischem Wörterbuch; neu bearbeitet. Leipzig 1828. Art. Gesicht. IV. 2. S. 1364*.

1830. Plagge Hecker's Annalen 1830. S. 404.

1834. Bartels Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. Berlin 1834. S. 61.

1836. A. W. Volkmann Untersuchung über den Stand des Netzhautbildchens. Poggd. Ann. XXXVII. 342*. — Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1836. Kap. IV.

1837. Joh. Mile über die Richtungslinien des Sehens. Poggd. Ann. XLII. 37 u. 235*.

1838. Volkmann Poggd. Ann. XLV. 207*. (Erwiderung gegen den Vorigen.)

1839. Gerling über die Beobachtung von Netzhautbildern. Poggd. Ann. XLVI. 243*.
Knochenhauer über die Richtungsstrahlen oder Richtungslinien beim Sehen. Poggd. Ann. XLVI. 248*.

1841. A. Burow Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. Berlin 1841. S. 16—93*.

1842. Vallée *Comptes rendus.* XIV. 481.
W. Stamm über Volkmann's Richtungslinien des Sehens. Poggd. Ann. LVII. 346*.

---

[1] Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen 1845.
[2] R. Wagner's Handwörterbuch d. Physiologie. Art. Sehen. S. 286*.
[3] Ebenda Art. Dioptrik des Auges.

1843. A. W. Volkmann J. Müller's Archiv für Anat. u. Physiol. 1843. S. 9 (gegen Burow).
1844. *L. Moser über das Auge in Dove's Repertorium d. Physik. S. 337—349*.
1845. J. B. Listing Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen 1845 [abgedr. aus d. Göttinger Studien]. S. 7—21*.
L. L. Vallée *Comptes rendus.* XX. 1338. — *Institut.* No. 393. p. 166.
1846. *A. W. Volkmann Artikel Sehen in R. Wagner's Handwörterbuch der Physiologie. III. 1. S. 281—290*.
1847. F. C. Donders Holländische Beiträge zu den anat. u. physiol. Wissensch. I. S. 107—112*.
1849. J. D. Forbes *Note respecting the dimensions and refracting power of the eye.* Proceedings Edinb. Roy. Soc. Decb. 3. 1840. p. 251. — Silliman Journal. (2.) XIII. 413.
1851. *J. B. Listing Artikel Dioptrik des Auges in R. Wagner's Handwörterbuch d. Physiol. IV. 451—504*.
1855. H. Helmholtz Graefe's Archiv für Ophthalmologie. I. 2. S. 1—74*.

Messungen der Brechungsverhältnisse:
1710. Hawksbee Phil. Transact. 1710. p. 204.
1785. A. Morno II. *On the structure and physiology of fishes.* p. 60.
1801. Th. Young Phil. Transact. 1801. I. 40*.
1818. Chossat *Bulletin des sc. par Société philomat. de Paris.* A. 1818. Juin. p. 294. — *Ann. de ch. et de ph.* VIII. p. 217.
1819. D. Brewster Edinb. Philos. Journ. 1819. No. 1. p. 47.
1840. Cahours et Becquerel *Institut.* 1840. p. 399.
1847. S. Pappenheim *Comptes rendas.* XXV. 901. — *Arch. d. sc. ph. et natur.* VII. 78.
Quesnel *revue scient.* XXXII. 144.
1849. Bertin *Comptes rendus.* XXVIII. 447. — *Institut.* 1849. No. 796. p. 105. — *Ann. d. ch. et de ph.* XXVI. 288. — *Arch. d. sc. ph. et nat.* XII. 45. — Poggd. Ann. LXXVI. 611.
1850. Engel Prager Vierteljahrsschrift für pract. Heilk. 1850. I. 152.
H. Mayer ebenda. 1850. IV. Beilage und 1851. IV. 92.
1852. Ryba ebenda. 1852. II. 95.
1855. W. Krause Die Brechungsindices der durchsichtigen Medien d. menschl. Auges Hannover 1855*.

§. 11. Zerstreuungsbilder auf der Netzhaut.

Wenn Licht von einem leuchtenden Punkte in das Auge fällt, so bildet dasjenige, welches durch die kreisförmige Pupille hindurchgegangen ist, hinter der Pupille einen Strahlenkegel, dessen Basis kreisförmig und nach vorn, dessen Spitze nach hinten gekehrt ist, und dem Bilde des leuchtenden Punktes entspricht. Jenseits ihres Vereinigungspunktes divergiren die Strahlen wieder. Es sei in *Fig. 46* a der leuchtende Punkt, $b_{,}b_{,,}$ die Pupille, c der Convergenzpunkt der Strahlen, $c\,d_{,}$ die Verlängerung des Strahles $b_{,}c$, ebenso $c\,d_{,,}$ die Verlängerung von $b_{,,}c$.



Fig. 46.

Wenn der Vereinigungspunkt der Strahlen gerade auf die Fläche der Netzhaut trifft, so beleuchtet der einzelne leuchtende Punkt a nur einen einzelnen Punkt c der Netzhaut, und es wird ein deutliches Bild des leuchtenden Punktes entworfen. Wenn aber die Netzhaut vor oder hinter dem Vereinigungspunkte der Strahlen, etwa in $f_{,}f_{,,}$ oder in $g_{,}g_{,,}$ von dem Strahlenkegel getroffen würde, so würde nicht blos ein einzelner Punkt, sondern eine dem kreisförmigen Durchschnitte

des Strahlenkegels entsprechende Kreisfläche der Netzhaut erleuchtet werden. Man nennt einen solchen von dem Licht eines leuchtenden Punktes ausserhalb des Auges beleuchteten Kreis der Netzhaut einen Zerstreuungskreis. Die Kreisform entspricht, wie aus dem Gesagten erhellt, der kreisförmigen Gestalt der Pupille. Wird deren Form oder die Grundfläche des einfallenden Lichtkegels geändert, was namentlich auch dadurch geschehen kann, dass man einen Schirm mit einer beliebig gestalteten kleinen Oeffnung von kleinerem Durchmesser als die Pupille dicht vor die Hornhaut bringt, so erhalten auch die Zerstreuungsfelder eine entsprechende andere Form, welche, auf den mittleren Theilen der Netzhaut wenigstens, der Grundfläche des Strahlenkegels immer geometrisch ähnlich ist. Sehr kleine Zerstreuungsbilder im Auge, welche in geringer Entfernung vom Vereinigungspunkte der Strahlen auf der Netzhaut entworfen werden, zeigen auffallende Abweichungen von diesen Regeln, wovon wir in §. 14 weiter handeln werden.

Objectiv kann man das Entstehen der Zerstreuungsbilder leicht nachahmen, indem man eine Sammellinse aufstellt, vor ihr in einiger Entfernung ein kleines Licht, oder besser einen Schirm mit einer engen Oeffnung, durch welche ein Licht scheint, und das Bild dieses Lichtes hinter der Linse auf einem weissen Papier auffängt, welches man der Linse bald nähert, bald von ihr entfernt. Dabei sieht man, dass nur in einer gewissen Entfernung von der Linse das Bild des Lichtpunktes scharf gezeichnet und punktförmig ist, sonst sich zu lichten Kreisen ausdehnt.

Bringt man vor der Linse als Object eine helle Linie an, z. B. einen schmalen Spalt in einem dunklen Schirme, hinter welchem ein Licht steht, so decken sich die Zerstreuungskreise der einzelnen hellen Punkte dieser Linie, wie in *Fig. 47. b* angedeutet ist, theilweis, und es erscheint statt der scharfen Linie *a* eine helle Figur ähnlich der *c*.

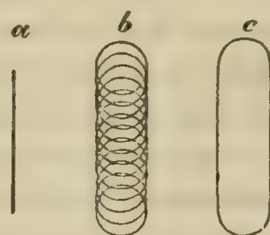


Fig. 47.

Wird eine scharf begrenzte gleichmässig helle Fläche in einem Zerstreuungsbilde abgebildet, so bleibt die Mitte der Fläche in unveränderter Helligkeit, die Ränder aber erscheinen verwachsen, so dass an ihnen die Helligkeit der Mitte der Fläche allmälig in die Helligkeit des umgebenden Grundes übergeht.

Dergleichen Zerstreuungsbilder können nun auch im Auge entworfen werden. Allerdings können wir nicht die Netzhaut willkührlich hin- und herrücken gleich dem Papierschirme bei der beschriebenen objectiven Darstellung der Zerstreuungsbilder, aber wir können den leuchtenden Punkt dem Auge nähern und ihn davon entfernen, so dass sein Bild im Glaskörper vor- und zurückweicht. Wie bei einem jeden optischen Systeme von kugeligen brechenden Flächen liegen die Bilder verschieden entfernter Gegenstände auch beim Auge in verschiedenen Entfernungen von den brechenden Flächen. Das Bild eines unendlich weit entfernten hellen Punktes liegt in der hinteren Brennebene des Auges, das Bild eines näheren leuchtenden Punktes hinter der Brennebene. Wenn also eines von diesen Bildern auf die Netzhaut fällt und scharf gezeichnet ist, so bildet das andere nothwendig einen Zerstreuungskreis. Daraus folgt:

Wir können verschieden weit vom Auge entfernte Gegenstände nicht gleichzeitig deutlich sehen.

Um sich davon zu überzeugen, halte man in der Entfernung von etwa 6 Zoll vor dem Auge einen Schleier oder anderes durchsichtiges Gewebe, und dahinter in etwa 2 Fuss Entfernung ein Buch, und schliesse ein Auge, so wird man sich leicht überzeugen, dass man es in seiner Gewalt hat, nach einander bald die Fäden des Schleiers, bald die Buchstaben des Buches zu betrachten und deutlich zu sehen, dass aber die Buchstaben undeutlich werden, während man die Fäden des Schleiers betrachtet, und dass der Schleier nur noch als eine leichte gleichmässige Verdunkelung des Gesichtsfeldes erscheint, während man die Buchstaben fixirt. Wenn man, ohne die Richtung des Auges zu verändern, bald den näheren, bald den ferneren Gegenstand betrachtet, fühlt man bei jedem solchen Wechsel, dass das Auge eine gewisse Anstrengung macht, um den Wechsel zu Stande zu bringen.

Denselben Versuch kann man mannigfach variiren. Man wende sich nach einem Fenster und halte etwa 6 Zoll vor dem Auge senkrecht eine Nadel, so dass sie einen der horizontalen Stäbe des Fensters kreuzt, so kann man entweder die Nadel fixiren, während dabei der Stab des Fensterkreuzes als verwaschener dunkler Streifen erscheint, oder das Fensterkreuz und die Gegenstände der Landschaft draussen fixiren, während die Nadel nur noch als ein verwaschener dunkler Streifen im Gesichtsfelde erscheint. Ebenso, wenn man durch ein Loch von 1 bis 2 Linien Durchmesser nach fernen Gegenständen sieht, kann man bald diese, bald die Ränder des Loches scharf sehen, nie aber beide zugleich. Indessen ist der Versuch in seiner ersten Gestalt am überrachendsten, und dabei zugleich jeder Verdacht, dass eine Aenderung in der Richtung der Sehaxe von Einfluss sei, am besten beseitigt.

Bei allen diesen Versuchen überzeugt man sich, dass, wenn man auch nicht gleichzeitig zwei verschieden entfernte Gegenstände deutlich sehen kann, es doch gelingt, indem man sie nach einander betrachtet, und dass man willkürlich bald den einen, bald den anderen deutlich, mit scharf begrenzten Umrissen erblicken kann.

Die eigenthümliche Veränderung, welche im Zustande des Auges vor sich geht, um bald ferne, bald nahe Gegenstände deutlich zu sehen, nennt man die Accommodation oder Adaptation des Auges für die Entfernung des Objects.

Für sehr ferne Objecte kann sich die Entfernung des Objects sehr beträchtlich verändern, ohne dass die Entfernung seines optischen Bildes von den Hauptpunkten des Auges sich merklich ändert. Wenn ein Auge für unendliche Entfernung accommodirt ist, so sind die Zerstreuungskreise auch für Objecte von etwa 12 Meter Entfernung immer noch so klein, dass keine merkliche Undeutlichkeit des Bildes entsteht. Ist aber das Auge für einen nahen Gegenstand accommodirt, so erscheinen Gegenstände in sehr kleinen Distanzen vor oder hinter jenem schon undeutlich. Den Theil der Gesichtslinie, in welchem die bei einem gegebenen Acommodationszustande des Auges ohne merkliche Undeutlichkeit sichtbaren Objecte liegen, hat J. Czermak die Accommodationslinie genannt. Die Länge dieser Accommodationslinien ist desto grösser, je weiter ihr Abstand vom Auge ist, und für einen sehr grossen Abstand unendlich gross.

Von dem angegebenen Verhalten kann man sich leicht überzeugen, wenn

man vor einem bedruckten Blatte in der Entfernung eines oder einiger Zolle eine Spitze als Fixationspunkt befestigt. Nähert man sich mit dem Auge der Spitze, so weit man sie deutlich sehen kann, und accommodirt das Auge für die Spitze, so erscheinen die Buchstaben undeutlich; je weiter man sich aber entfernt, immer das Auge für die Spitze accommodirend, desto deutlicher werden sie.

Eben weil die Zerstreuungskreise ferner Gegenstände sehr klein sind, wenn das Auge für andere ferne Gegenstände accommodirt ist, ist es auch möglich zu visiren, d. h. zu erkennen, ob verschieden entfernte Punkte an einer Stelle des Gesichtsfeldes liegen. Streng genommen kann man immer nur einen der beim Visiren betrachteten Punkte deutlich sehen, die anderen in grösseren und kleineren Zerstreuungskreisen. Eine genaue Deckung zweier Punkte nehmen wir an, wenn der deutlich gesehene Punkt in der Mitte des Zerstreuungsbildes des anderen liegt. Eine Linie, welche durch zwei sich deckende Punkte gezogen ist, nennen wir Visirlinie. Die Visirlinien kreuzen sich in einem Punkte des Auges, nämlich im Mittelpunkte des von der Hornhaut entworfenen Bildes der Pupille, dem Kreuzungspunkte der Visirlinien.

Dass bei der Accommodation nicht blos, wie mehrere Physiologen früher annahmen, die Art, wie das Netzhautbildchen empfunden wird, sich verändere, sondern dass das optische Bild auf der Netzhaut selbst Veränderungen erleide, lässt sich am unzweifelhaftesten bei der Untersuchung eines lebenden Auges mit dem Augenspiegel nachweisen. Durch dieses Instrument, welches in §. 16 beschrieben werden wird, kann man den Hintergrund des Auges, also die Netzhaut mit ihren Gefässen und die auf ihr entworfenen Bilder, deutlich sehen. Lässt man das beobachtete Auge einen Gegenstand in einer gewissen Entfernung fixiren, so findet man, dass das Bild eines Lichtes, welches in derselben Entfernung steht, auf der Netzhaut ganz scharf entworfen wird, während man in dem hellen Grunde des Bildes auch die Gefässe und sonstigen anatomischen Einzelnheiten der Netzhaut deutlich sieht. Wenn man aber das Licht sehr nähert, wird sein Bild undeutlich, während die Einzelnheiten des Gewebes der Netzhaut deutlich bleiben. Die Versuche, die Veränderungen der Bilder an todten Augen, denen man den hinteren Theil der Sclerotica und Chorioidea weggenommen hatte, zu sehen, oder an Augen weisser Kaninchen, deren Sclerotica sehr durchscheinend ist, sind meist gescheitert, weil unter diesen Umständen die Bilder überhaupt nicht mehr genau genug sind, um kleine Veränderungen an ihnen wahrzunehmen. Auch für das lebende Auge sind nur an verhältnissmässig feinen Gegenständen die Veränderungen des Bildes bei veränderter Adaptation auffällig. Grössere Gegenstände erkennen wir auch bei unpassender Accommodation noch ihrer Form nach. In dem Netzhautbilde eines todten Auges erscheinen aber überhaupt nur noch grössere Objecte, die feineren sind verwischt, wie man sogleich erkennt, wenn man es künstlich vergrössert, so dass die Bilder dem Beobachter in ähnlicher Grösse erscheinen, wie sie dem beobachteten Auge, als es lebte, erschienen waren.

Eine noch nähere Erläuterung der Adaptationserscheinungen und der verschiedenen Lage des Vereinigungspunktes der Strahlen zur Netzhaut giebt der Scheiner'sche Versuch. Man steche durch ein Kartenblatt mit einer Nadel zwei

Löcher, deren Entfernung kleiner ist als der Durchmesser der Pupille, und blicke nun durch die beiden Löcher nach einem feinen Gegenstande hin, der sich dunkel auf hellem Grunde oder hell auf dunklem Grunde scharf abzeichnet, z. B. nach einer Nadel, die man vor den hellen Hintergrund des Fensters hält, und zwar vertical, wenn die Löcher des Kartenblatts horizontal neben einander liegen, dagegen horizontal, wenn letztere vertical übereinander stehen. Fixirt man nun die Nadel selbst, so sieht man sie einfach, fixirt man dagegen einen näheren oder ferneren Gegenstand, so erscheint sie doppelt. Schiebt man dann von der Seite her einen Finger über das Kartenblatt, so dass er eines der Löcher verdeckt, so findet man in dem Falle, wo das Bild der Nadel einfach ist, keine andere Veränderung, als dass das Gesichtsfeld dunkler wird. Sieht man dagegen die Nadel doppelt, so verschwindet beim Verdecken der Oeffnung eines der Doppelbilder, während das andere unverändert stehen bleibt, und zwar verschwindet, wenn man einen ferneren Gegenstand, als die Nadel ist, fixirt, das linke Bild der Nadel beim Verdecken des rechten Loches; wenn man aber das Auge für einen näheren Gegenstand eingerichtet hat, verschwindet das rechte Bild beim Verdecken des rechten Loches. Hat man sich noch nicht genügend geübt, das Auge für die Nähe und Ferne zu accommodiren, ohne dass man einen entsprechenden Fixationspunkt hat, so stelle man zwei Nadeln hinter einander vor einem hellen Hintergrunde auf, die eine in 6 Zoll, die andere in 2 Fuss Entfernung, die eine horizontal, die andere vertical, und fixire die eine, um die Doppelbilder der anderen zu sehen, wobei man natürlich die Löcher des Kartenblatts stets quer gegen die Richtung der Nadel stellen muss, welche doppelt erscheinen soll.

Macht man drei Löcher in ein Kartenblatt, welche nahe genug zusammenstehen, um gleichzeitig vor die Pupille gebracht zu werden, so erscheinen drei Bilder der Nadel. Haben die Löcher die Stellung wie in *Fig. 48. a*, so erscheinen bei der Accommodation für einen näheren Gegenstand drei Nadeln in der Stellung wie bei *b*, so dass ihre Köpfe die Stellung der Löcher in gleichem Sinne wiedergeben.



Fig. 48.

Bei der Accommodation für einen ferneren Gegenstand erscheinen die Nadeln in der Stellung *c*, so dass ihre Köpfe ein umgekehrtes Bild von der Stellung der Löcher geben. Ganz dieselben Doppelbilder zeigen sich, wenn man einen hellen Gegenstand auf dunklem Grunde, eine Oeffnung eines dunklen Schirms, durch welche Licht fällt, oder ein Nadelköpfchen, welches Sonnenlicht reflectirt, betrachtet.

Die Erklärung dieser Versuche ergiebt sich leicht aus entsprechenden Versuchen mit Glaslinsen. Es sei *Fig. 49 b* eine Sammellinse, vor welcher ein undurchsichtiger Schirm mit zwei Oeffnungen *e* und *f* angebracht ist; *a* sei ein leuchtender Punkt und *c* der Vereinigungspunkt für seine Strahlen, nachdem sie durch die Linse gegangen sind. Es werden demgemäss alle Strahlen der beiden Strahlenbündel, welche durch die beiden Oeffnungen des Schirms *e* und *f* gehen, sich im Punkte *c* schneiden, und ein weisser Schirm, welcher in *c* angebracht ist, wird nur eine helle Stelle als Bild des Lichts zeigen. Ein Schirm aber, der

vor dem Vereinigungspunkte in *m m*, oder hinter ihm in *l l* angebracht ist, wird die den beiden Oeffnungen entsprechenden Strahlenbündel gesondert auffangen

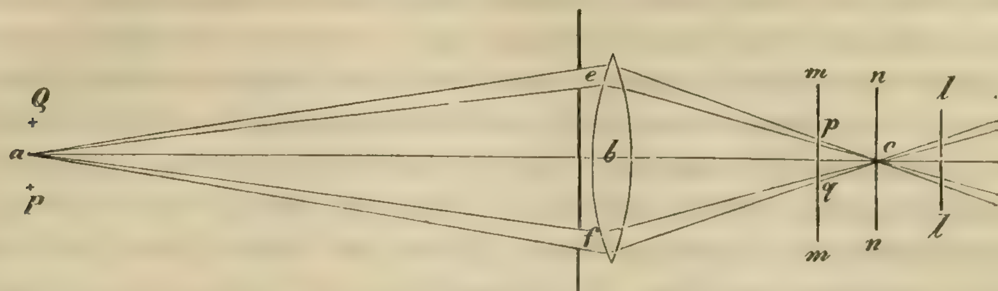


Fig. 49.

und zwei helle Stellen zeigen. Denkt man sich statt der Glaslinse die brechenden Mittel des Auges, statt des Schirms die Retina gesetzt, so ergiebt sich analog, dass ein Punkt der Retina vom Lichte getroffen wird, wenn ihre Fläche durch den Vereinigungspunkt der Strahlen geht, zwei Punkte dagegen, wenn sie sich vor oder hinter dem Vereinigungspunkte der Strahlen befindet. Die Stellung des Schirms in *m* entspricht dem Falle, wo das Auge für einen ferneren, die bei *l*, wo es für einen näheren Gegenstand accommodirt ist. Nur ein scheinbarer Widerspruch zeigt sich. Wenn man nämlich in dem Versuche mit der Glaslinse die obere Oeffnung *e* des durchbrochenen Schirms verdeckt, verschwindet bei der Stellung des Schirms in *m* das gleichzeitige obere Bild, bei dem fernsehenden Auge aber das entgegengesetzte. Bei der Stellung des Schirms in *l* verschwindet umgekehrt bei der Glaslinse das entgegengesetzte, in dem nahsehenden Auge dagegen das gleichseitige Bild. Der Widerspruch erklärt sich dadurch, dass die Bilder auf der Netzhaut stets umgekehrt sind, also einem tiefer liegenden lichten Gegenstande ein höher stehendes Bild auf der Netzhaut entspricht. Wird also die in *m* stehende Netzhaut bei *p* und *q* von Licht getroffen, so schliesst der Sehende von dem oberen Punkte *p* auf einen im Gesichtsfelde unterhalb des wirklichen leuchtenden Punktes bei *P* liegenden Gegenstand, und aus dem unteren Punkte *q* auf einen oberhalb bei *Q* liegenden. Wird die Oeffnung *e* verdeckt, so verschwindet demnach der obere helle Punkt *p* auf der Netzhaut, und der Experimentirende glaubt deshalb den Gegenstand *P* verschwinden zu sehen, welcher der verdeckten Oeffnung entgegengesetzt ist. Umgekehrt beim Fixiren eines nahen Gegenstandes, wo die Netzhaut dem Schirme in *l* entspricht.

Bringt man vor der Glaslinse einen Schirm mit drei Oeffnungen, wie in *a Fig. 48*, an, so entstehen auch drei lichte Punkte auf dem in *m* oder *l* gestellten Schirme, und zwar in *m* gleich, in *l* dagegen entgegengesetzt gerichtet als auf dem vorderen Schirme; also wieder umgekehrt, als es scheinbar im Auge der Fall ist, was sich in derselben Weise erklärt, wie eben geschehen ist.

Bringt man vor die Glaslinse einen Schirm mit einer Oeffnung, und bewegt ihn hin und her, so bleibt das Bild des lichten Punktes unbeweglich, wenn (siehe in *Fig. 49*) der Vereinigungspunkt *c* der Lichtstrahlen in den auffangenden Schirm fällt. Steht dieser Schirm aber vor *c* in *m*, so bewegt sich das Bild in demselben Sinne wie die Oeffnung vor dem Glase. Steht der auffangende Schirm in *l* hinter dem optischen Bilde, so bewegt es sich in entgegengesetzter Richtung.

Entsprechendes findet beim Auge statt. Sieht man durch eine kleine Oeffnung eines Kartenblatts nach einer Nadel, fixirt einen fernen Gegenstand und bewegt das Kartenblatt, so bewegt sich die Nadel scheinbar in entgegengesetztem Sinne. Fixirt man dagegen einen näheren Punkt, so bewegt sie sich in gleichem Sinne wie das Kartenblatt. Die Erklärung dieser Versuche ergiebt sich leicht aus dem Vorausgeschickten, wenn man für *Fig. 49* annimmt, dass der Schirm nicht zwei Oeffnungen, sondern nur eine hat, die sich bald in *e*, bald in *f* befindet.

Man kann einen Schirm mit enger Oeffnung, welche man vor das Auge bringt, auch benutzen, um Gegenstände deutlich zu sehen, für welche man das Auge nicht accommodiren kann. Die Grundfläche des in das Auge eindringenden Strahlenkegels wird dadurch kleiner, und in demselben Verhältnisse auch alle seine Querschnitte, zu denen auch der Zerstreuungskreis auf der Netzhaut gehört.

Wenn man einen nahe vor dem Auge befindlichen Gegenstand, der deshalb im Zerstreuungsbilde erscheint, durch eine feine Oeffnung betrachtet, erscheint er aus dem angeführten Grunde deutlich und ausserdem vergrössert. Ja, er erscheint sogar grösser, als wenn man ihn ohne Oeffnung bei derselben Entfernung im Zerstreuungsbilde betrachtet. Seine Vergrösserung wird um so bedeutender, je mehr man die Oeffnung vom Auge entfernt. Diese Erscheinungen erklären sich auf folgende Weise. Es seien in *Fig 50* a und b zwei leuchtende Punkte des Objects, S der Schirm, A das Auge. Vom Punkte a fällt durch die Oeffnung des Schirms nur der Lichtstrahl $a\,m_1$ in das Auge, von b $b\,m_2$. Ist $\beta\,\alpha$ das dem Objecte $a\,b$ entsprechende Bild, welches die Augenmedien entwerfen, so geht der Strahl $a\,m_1$ nach der Brechung nach α und schneidet die Netzhaut in f; der Strahl $b\,m_2$ geht dagegen nach β und trifft die Netzhaut in g. Zieht man von f und g aus die Linien $f\,\varphi$ und $g\,\gamma$ durch den Knotenpunkt des Auges k, so geben diese die Richtungen an, in welchen leuchtende Punkte beim gewöhnlichen deutlichen Sehen liegen müssten, um sich in f und g abzubilden. In diese Linien verlegt unser Urtheil deshalb auch die Punkte a und b.

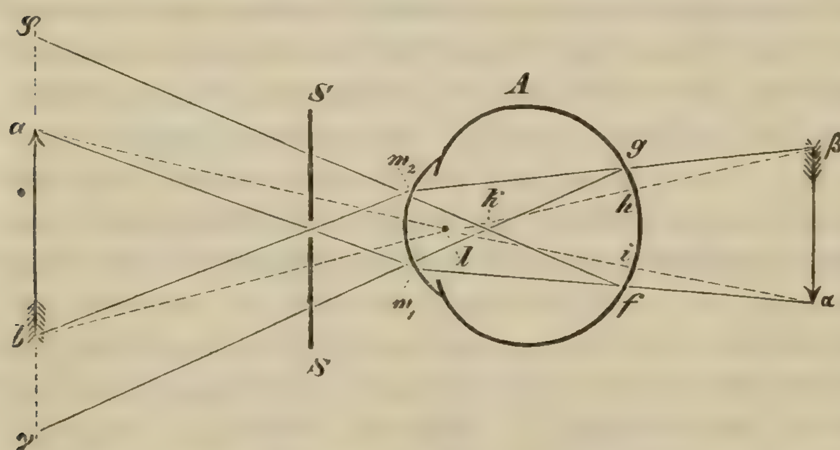


Fig. 50.

Wenn der Schirm sich vom Auge entfernt und dem Objecte nähert, ist leicht ersichtlich, dass die Punkte m_1 und m_2 und ebenso die Linien $m_1\,\alpha$ und $m_2\,\beta$ mit den Punkten f und g sich von der Augenaxe entfernen müssen. Das Netzhautbild wird in diesem Falle also grösser.

Nehmen wir den Schirm weg, so entwirft jeder lichte Punkt des Objects einen Zerstreuungskreis. Die Mittelpunkte der Zerstreuungsbilder von a und b sind dann auf der Netzhaut weniger von einander entfernt als die Punkte f und g, wo diese Punkte bei vorgehaltenem Schirme sich abbilden. Der Mittelpunkt der

Zerstreuungskreise wird bestimmt durch den Axenstrahl des Strahlenkegels, d. h. durch den Strahl, welcher durch den Mittelpunkt der Pupille gegangen ist. Es sei *l* dieser Punkt. Der von *a* durch *l* nach α gehende Strahl trifft dann die Netzhaut in *i*, der von *b* durch *l* nach β gehende in *h*. Die Punkte *h* und *i* sind also die Mittelpunkte der Zerstreuungsbilder, wenn der Schirm entfernt wird. Sie liegen einander näher als die Punkte *f* und *g*.

Sieht man dagegen durch eine enge Oeffnung nach entfernten Gegenständen, während man das Auge für die Nähe accommodirt, so erscheinen die Gegenstände kleiner, und desto kleiner, je weiter man die Oeffnung vom Auge entfernt.

Die Entfernungen, für welche sich das menschliche Auge accommodiren kann, sind bei verschiedenen Individuen sehr verschieden. Man nennt den dem Auge nächsten Punkt, für den eine vollständige Accommodation ausgeführt werden kann, den Nähepunkt, den entferntesten den Fernpunkt der Accommodation. Bei normalen Augen pflegt der Nähepunkt in 4 bis 5 Zoll Entfernung zu liegen, der Fernpunkt in sehr grosser, vielleicht zuweilen in unendlicher Entfernung. Eine unendliche Entfernung des Fernpunktes scheint aber doch, selbst bei Leuten, die im Freien leben und nur ferne Gegenstände zu betrachten haben, mindestens eine grosse Seltenheit zu sein, da ganz allgemein eine strahlige Figur von den Menschen als Stern bezeichnet zu werden pflegt, und die Allgemeinheit dieses Sprachgebrauchs darauf hinweist, dass sie die Sterne strahlig sehen, was wiederum ein Zeichen ist, dass sie nicht für unendliche Ferne adaptiren, wie in §. 14 auseinandergesetzt werden wird.

Kurzsichtige oder myopische Augen nennt man solche, deren Fernpunkt in geringer Entfernung, oft nur wenige Zolle vom Auge liegt; der Nähepunkt rückt dabei gewöhnlich ebenfalls sehr viel näher. Weitsichtige oder presbyopische Augen nennt man dagegen solche, deren Nähepunkt weiter entfernt ist, oft mehrere Fuss vom Auge absteht. Der Fernpunkt dieser Augen scheint im Allgemeinen nicht in demselben Verhältnisse in die Ferne zu rücken, vielmehr stehen zu bleiben, so dass die Breite ihrer Accommodation überhaupt eine geringere wird, und die Fähigkeit einer Veränderung des brechenden Apparates auch wohl ganz verloren geht. Nur als seltenere krankhafte Verbindung und nach der Entfernung der Krystallinse durch Staaroperationen kommen so weitsichtige Augen vor, welche im Stande sind, convergirend in das Auge fallende Strahlen auf der Netzhaut zu vereinigen, also z. B. unendlich entfernte Gegenstände durch schwache Sammellinsen deutlich zu sehen. Kurzsichtigkeit pflegt die Folge solcher Beschäftigungen zu sein, bei denen nahe Gegenstände anhaltend und scharf betrachtet werden. Weitsichtigkeit pflegt im höheren Alter zu entstehen, daher der griechische Name Presbyopie (von πρεσβυς, der Greis); auch kommt bei Schiffern, Hirten, Jägern und anderen Personen, welche meist nur auf ferne Gegenstände ihre Aufmerksamkeit zu richten haben, eine Unfähigkeit, das Auge für nahe Gegenstände zu accommodiren, vor, welche durch Mangel an Uebung bedingt zu sein scheint. Das bekannte Mittel, den Beschwerden dieser Zustände abzuhelfen, ist der Gebrauch von Brillen. Kurzsichtige gebrauchen concave Linsen, welche von fernen Gegenständen nähere Bilder entwerfen, die bis an den Fern-

punkt des betreffenden Auges herangerückt werden müssen. Weitsichtige gebrauchen convexe Linsen, welche von nahen Gegenständen entferntere Bilder entwerfen, für welche ein solches Auge sich accommodiren kann.

Wenn man das Auge in Wasser taucht, fällt die Brechung der Lichtstrahlen an der Hornhaut fast ganz fort, und es bleibt nur die in der Krystallinse wirksam, welche nicht hinreicht, um deutliche Bilder auf der Netzhaut zu entwerfen. Das Auge verhält sich dann wie ein überweitsichtiges, und braucht eine stark convexe Linse als Brille, um irgend etwas zu erkennen.

Um die Grösse der Zerstreuungskreise berechnen zu können, bemerke man zunächst, dass alle Strahlen, die ausserhalb des Auges auf die scheinbare (d. h. durch die Hornhaut gesehene) Pupille hinzielen, nach der Brechung in der Hornhaut die wirkliche Pupille treffen, und dass sie im Glaskörper so verlaufen, als kämen sie von dem Bilde der Pupille her, welches die Linse nach hinten zu entwirft. Es ergiebt sich dies sogleich aus dem Begriffe des optischen Bildes. Ein gewisser Punkt der wirklichen Pupille und der correspondirende Punkt ihres Hornhautbildes sind in Rücksicht auf die Brechung an der Hornhaut correspondirende Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen. Strahlen, die von dem Punkte der wirkliche Pupillen aus nach vorn gehen, scheinen vor dem Auge von dem Bilde dieses Punktes zu kommen, und umgekehrt, Strahlen, welche in der Luft nach einem Punkte der scheinbaren Pupille convergiren, müssen sich nach der Brechung an der Hornhaut in dem entsprechenden Punkte der wirklichen Pupille vereinigen.

Listing nimmt für sein schematisches Auge an, dass die Iris $1/2$ Mm. vor der vorderen Linsenfläche liege, und berechnet, dass alsdann ihr von der Linse entworfenes Bild um $1/15$ vergrössert und um 0,055 Mm. nach hinten gerückt sei. Verlegt man dagegen die Pupille dicht an die Vorderfläche der Linse, was naturgemässer ist, so beträgt die Vergrösserung nur etwa $1/18$ (genauer $3/53$), und sie wird um 0,113 Mm. nach hinten gerückt. Behält man die übrigen Data von Listing's schematischem Auge bei, so würde der Abstand des Linsenbildes der Pupille von der Netzhaut gleich 18,534 Mm. zu setzen sein. Durch die Hornhaut würde dieselbe Pupille dagegen um $1/7$ (genauer $13/90$) vergrössert und um 0,578 Mm. vorgerückt erscheinen.

Die Grösse der Zerstreuungskreise auf dem mittleren Theile der Netzhaut lässt sich auf folgende Weise berechnen. Es sei *Fig. 51* $g f$ die Augenaxe, $q g$ ein vor dem Auge liegendes Object, und die Linie $q g$ senkrecht gegen $f g$. Es sei ferner p das Bild von q und f von g; α d die Netzhaut, welche wir als eine auf die Augenaxe senkrechte Ebene betrachten, da nur Bilder auf der Mitte der Netzhaut in Betracht gezogen werden sollen; $a b$ sei das Linsenbild der Pupille, $A B$ das Hornhautbild, beide senkrecht gegen die Augenaxe, die von ihren Ebenen in den Punkten c und C geschnitten wird. Die von dem Rande der Pupille ausgehenden Strahlen $a p$ und $b p$ schneiden die Netzhaut in α und β, so dass $\alpha \beta$ ein Durchmesser des Zerstreuungskreises ist, dessen Grösse berechnet werden soll. Da $a b$ parallel αd ist, ist nach bekannten geometrischen Sätzen:

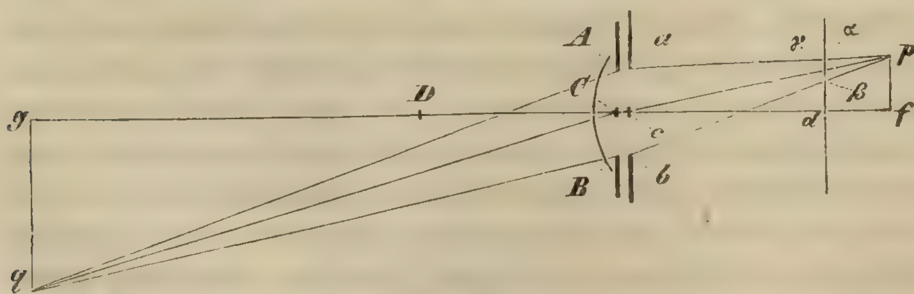


Fig. 51.

$$a p : \alpha p = a b : \alpha \beta$$
$$a p : \alpha p = c f : d f, \text{ also auch}$$
$$\alpha \beta = \frac{a b \cdot d f}{c f} \Bigg\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\,a).$$

Fällt die Ebene der Netzhaut mit der hinteren Brennebene des Auges zusammen, und ist D der vordere Brennpunkt des Auges, so können wir wie in §. 9 Gleichung 8) bezeichnen $C D$ mit H_1, $c d$ mit H_2. $C g$ mit h_1, $c f$ mit h_2 (statt h_{m+1}) und haben dann wie dort

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_2} = 1 \quad \text{oder}$$
$$\frac{H_1}{h_1} = \frac{h_2 - H_2}{h_2} = \frac{d f}{c f}, \text{ also}$$
$$\alpha \beta = a b \cdot \frac{H_1}{h_1} \Bigg\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\,b).$$

Wenn c der Mittelpunkt des Linsenbildes der Pupille ist, also $a c = b c$, und der Strahl $c p$ die Netzhaut in γ schneidet, so ist γ der Mittelpunkt des Zerstreuungskreises. Denn wegen des Parallelismus von $a b$ und $\alpha \beta$ verhält sich

$$a c : b c = \alpha \gamma : \beta \gamma$$
$$a c = b c, \text{ folglich}$$
$$\alpha \gamma = \beta \gamma.$$

Der Strahl also, welcher die Mitte des Zerstreuungskreises trifft, geht im Glaskörper verlängert durch den Mittelpunkt des Linsenbildes der Pupille. Wir können hinzusetzen, er geht in der vorderen Kammer in der That durch den Mittelpunkt der wirklichen Pupille und in der Luft verlängert durch den Mittelpunkt des Hornhautbildes der Pupille.

Daraus folgt, dass, wenn die Mittelpunkte der Zerstreuungskreise für zwei ungleich vom Auge entfernte Punkte auf einander fallen, der nach diesem gemeinsamen Mittelpunkte von dem Mittelpunkte des Linsenbildes der Pupille gehende Strahl beiden Strahlensystemen gemeinsam sein muss. Die Fortsetzung dieses gemeinsamen Strahls vor dem Auge muss also auch beide leuchtende Punkte treffen, und wird verlängert durch den Mittelpunkt des Hornhautbildes der Pupille gehen. Dasselbe wird der Fall sein, wenn das eine Zerstreuungsbild sich auf einen Punkt reducirt, der im Mittelpunkte des anderen Zerstreuungskreises liegt.

Beim Visiren decken sich zwei ungleich entfernte Punkte, wenn das Bild des einen in die Mitte des Zerstreuungsbildes des anderen fällt, oder die Mittelpunkte beider Zerstreuungsbilder auf einander fallen, falls beide undeutlich gesehen werden. Die sie verbindende gerade Linie haben wir Visirlinie genannt. Sie muss nach der eben gemachten Auseinandersetzung mit dem Strahle zusammenfallen, der nach dem Mittelpunkte des Hornhautbildes der Pupille geht, und dieser letztere Punkt wird deshalb der Kreuzungspunkt aller Visirlinien sein.

Der Begriff des Gesichtswinkels hängt hiermit nahe zusammen. Wenn man sagt, dass Objecte, die unter gleichem Gesichtswinkel erscheinen, gleiche scheinbare Grösse haben, so muss man den Scheitel des Gesichtswinkels in den Kreuzungspunkt der Visirlinien legen. Gewöhnlich hat man ihn aber in den Kreuzungspunkt der Richtungslinien (den ersten Knotenpunkt) verlegt, und wenn es sich um Fälle handelt, wo die beiden gesehenen Punkte nach einander direct gesehen werden, würde man ihn in den Drehpunkt des Augapfels legen müssen. Für sehr weit ent-

fernte Punkte wird die Grösse des Gesichtswinkels dadurch nicht verändert, für nahe aber allerdings.

Ich füge hier noch eine kleine Tafel bei, welche Listing für sein schematisches Auge unter der Annahme berechnet hat, dass die Netzhaut in der zweiten Brennebene des Auges liege, und die Pupille 4 Mm. Durchmesser habe. Es sind darin angegeben unter l_1 die Entfernungen des leuchtenden Punktes von dem vorderen Brennpunkte nach vorn, unter l_2 die des Bildes von der Netzhaut nach hinten, unter z der Durchmesser des Zerstreuungskreises. Die Rechnung ist ausgeführt nach der Gleichung §. 9. 8 c)

$$l_1 \, l_2 = F_1 \, F_2$$

und §. 11. 1a), Das Product $F_1 \, F_2$ ist für Listing's schematisches Auge gleich 301,26 Quadratmillimeter. (Als runde Zahl genügt 300.)

l_1	l_2	z
∞	0 Mm.	0 Mm.
65 Meter.	0,005	0,0011
25	0,012	0,0027
12	0,025	0,0056
6	0,050	0,0112
3	0,100	0,0222
1,5	0,200	0,0443
0,75	0,40	0.0825
0,375	0,80	0,1616
0,188	1,60	0,3122
0,094	3,20	0,5768
0,088	3,42	0,6484

Man sieht aus dieser Tabelle auch, wie wenig sich die Lage des Bildchens ändert, wenn die sich ändernde Entfernung des Objects noch sehr gross ist, und wie schnell das Bildchen sich von der Netzhaut entfernt, wenn das Object in geringer Entfernung vom Auge sich mehr und mehr nähert.

Um zu ermitteln, für welche Entfernungen sich ein Auge accommodiren kann, sind verschiedene Instrumente, **Optometer**, vorgeschlagen worden.

Die zuerst sich darbietende Methode, nach welcher wir im täglichen Leben Kurzsichtigkeit und Weitsichtigkeit zu unterscheiden pflegen, ist die, zu beobachten, in welcher Entfernung kleinere Gegenstände, z. B. Buchstaben, am besten gesehen werden. Indessen ist dabei keine grosse Genauigkeit der Angaben möglich. Einmal sind gedruckte Buchstaben nie so klein, um nicht auch bei ziemlich beträchtlichen Abweichungen der Accommodation noch gelesen werden zu können. So kann ich eine Druckschrift, wie die vorliegende, in 13 Zoll Entfernung noch lesen, während mein Auge für seinen Fernpunkt, 3 Fuss Entfernung, accommodirt ist. Und ebenso kann ich sie in 2,7 Zoll Entfernung lesen, obgleich ich das Auge nur auf 3,6 Zoll accommodiren kann. Ausserdem ist zu bemerken, dass die Gegenstände, wenn man sie dem Auge nähert, unter einem grösseren Gesichtswinkel erscheinen, und deshalb unter übrigens gleichen Umständen deutlicher erkannt werden als in grösserer Entfernung. Sehr kleine, schwer zu erkennende Gegenstände werden deshalb dem Auge zuweilen näher gebracht, als die Accommodationsdistanz ist, weil man bei geringer Ungenauigkeit des Bildes und grösserem Sehwinkel zuweilen mehr erkennt, als bei genauer Accommodation und geringerem Sehwinkel. Will man also die Accommodationsweiten auf diese Art ermitteln, so muss man

für verschiedene Abstände verschiedene Gesichtsobjecte wählen, und alle so fein, dass sie in der betreffenden Entfernung von einem gut accommodirten Auge nur eben noch erkannt werden können.

Porterfield [1] hat zuerst den Scheiner'schen Versuch zur Untersuchung der Sehweiten empfohlen, und darauf ein Optometer gegründet, welches Th. Young [2] verbesserte. Letzterer empfiehlt einen feinen weissen Faden auf dunklem Grunde auszuspannen, so dass sein eines Ende nahe unter dem Auge sich befindet, und dann durch einen Schirm mit zwei Löchern nach dem Faden zu sehen. Er erscheint dann nur an der Stelle, für welche das Auge accommodirt ist, einfach, an allen übrigen Stellen doppelt. Die einfach erscheinende Stelle kann leicht bezeichnet werden. Ihre Entfernung vom Auge entspricht der beim Versuche stattfindenden Sehweite des Auges. Uebrigens kann man auch andere feine Objecte benutzen, welche man in verschiedene Entfernung vom Auge bringt. Man muss die Objecte für diese Versuche so fein wählen, dass sie durch die Löcher des Schirms eben noch deutlich gesehen werden können, z. B. feine Nadeln auf hellem Grunde, oder feine Löcher und Spalten in dunklen Schirmen. Auch muss man darauf achten, dass man das Object durch beide Löcher gleichzeitig erblickt, sonst ist man Irrungen leicht ausgesetzt. Das Gesichtsfeld reducirt sich bei diesen Versuchen auf die verhältnissmässig breiten Zerstreuungsbilder der beiden Löcher des Schirms, welche zum Theil in einander greifen müssen, wie *Fig. 52 a* und *b* darstellt. Nur in dem mittleren gemeinsamen Theile *c*, welcher zugleich am hellsten ist, können Doppelbilder erscheinen, wie die Nadelspitzen *g*, nicht aber in den seitlichen Theilen, welche nur je einem Zerstreuungsbilde angehören. In den letzteren erscheinen die Bilder stets einfach, wie die Nadel *h*. Dieser Umstand macht für ungeübte Personen das Gelingen des Versuchs oft schwierig.

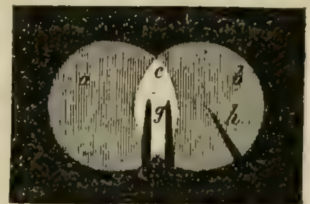


Fig. 52.

Eine ähnliche Methode, um die Accommodationsdistanzen, namentlich den Fernpunkt zu bestimmen, schien mir in der Ausführung noch grössere Genauigkeit zu geben als das Sehen durch zwei Löcher. Man lässt durch eine kleine Oeffnung eines Schirms Licht des Himmels oder einer Kerzenflamme fallen. Solch ein kleiner Lichtpunkt erscheint einem Auge, welches nicht genau für ihn adaptirt ist, als ein fünf- oder sechsstrahliger Stern (s. unten §. 14), während er bei passender Accommodation als ein ziemlich gut begrenzter, wenn auch nicht ganz regelmässig runder Lichtpunkt erscheint. Schiebt man nun einen Schirm von der Seite her vor die Pupille, so sieht man die Lichtfigur, welche der Punkt bildet, in der Regel von einer Seite her sich verdunkeln, und zwar von derselben Seite, wo der Schirm vorgeschoben wird, wenn das Object weiter entfernt ist, als die Accommodationsdistanz beträgt; von der entgegengesetzten Seite dagegen, wenn es näher ist. Bei richtiger Accommodation dagegen wird das Object entweder in allen seinen Theilen gleichzeitig dunkler, oder es wird in unregelmässiger Weise verlöscht, so dass es z. B. oben und unten an zu schwinden fängt, während man den Schirm von einer Seite her vor die Pupille schiebt.

Ein anderes Mittel, die Sehweite zu bestimmen, welche namentlich für Ungeübte leichter ausführbar ist als der Scheiner'sche Versuch, ist von der Farbenzerstreuung im Auge hergenommen, und wird in §. 13 beschrieben werden.

Ruete's Optometer ist bestimmt, sich gegen absichtliche Täuschungen durch den Untersuchten zu sichern. Es ist ein kastenartiger Schirm, durch welchen eine Röhre geht. Der zu untersuchende Mensch blickt durch diese Röhre auf ein Buch, von dem er nur einige Worte sieht, und dessen Entfernung zu beurtheilen er kein Mittel hat (als die Adaption des Auges selbst). Man hält ihm bald kleinere, bald grössere Druckschrift in verschiedenen Entfernungen vor, bei beabsichtigter Täuschung wird er schwer vermeiden, sich in Widersprüche zu verwickeln.

Hasner's Optometer ist ein horizontales Brett auf Stativ, an einem Ende mit einer Maske

---

[1] *On the eye.* Vol. I. p. 423. — *Edinb. medical Essays.* IV. 185.
[2] *Phil. Transactions.* 1801. P. I. p. 34.

für den oberen Theil des Gesichts versehen, um die Lage der Augen dadurch zu fixiren. Auf dem Brette sind Theilungen angebracht, um die Entfernung von den Augen zu messen; es sind ausserdem die Convergenzwinkel der Augenaxen für die verschiedenen Punkte der Mittellinie darauf verzeichnet. Das Instrument ist dazu bestimmt, die verschiedenen Versuche über Accommodationsdistanzen, über Einfachsehen und Doppeltsehen mit beiden Augen bequem ausführen zu lassen.

Künstliche Augen zur Erläuterung von Kepler's Theorie des Sehens und der Wirkung der Brillen sind beschrieben worden von Haller[1], Huygens[2], Wolf[3], Adams[4] und Kries[5].

Kepler[6], welcher zuerst richtige Begriffe von der Brechung des Lichts im Auge hatte, sah auch die Nothwendigkeit einer Accommodation des Auges für verschiedene Entfernungen ein, und erklärte die bei unpassender Accommodation auftretenden Zerstreuungskreise. Scheiner[7] beschrieb die Erscheinungen, welche bei unpassender Accommodation eintreten, wenn man durch einen Schirm mit zwei Oeffnungen sieht. Erklärungen dieses Versuches gaben de la Hire[8], der aber dabei die Möglichkeit der Accommodation für verschiedene Entfernungen läugnete, später J. de la Motte[9] und Porterfield[10], welcher Letztere zugleich die irrigen, von de la Hire aus dem Versuche gezogenen Schlüsse berichtigte. Die scheinbaren Bewegungen eines ausser der Sehweite liegenden Gegenstandes, wenn man ihn durch eine enge Oeffnung erblickt und diese selbst bewegt, erwähnt Mile[11] zuerst, und beschrieb später H. Mayer[12] ausführlicher, mit Beziehung auf die Theorie der Accommodation.

Eine ausführliche Darstellung des Entstehens der Zerstreuungskreise, ihres Uebereinandergreifens u. s. w. gab Jurin[13].

Was den Gebrauch der Brillengläser betrifft, so kommt bei Plinius[14] eine Stelle vor, welche darauf hinzudeuten scheint. Er berichtet, dass concave Smaragde vorkämen, welche das Gesicht sammelten (*visum colligere*), und deshalb nicht geschnitten werden dürften. Der Kaiser Nero, welcher kurzsichtig war (Plinius l. II. c. 34), sah durch einen solchen Smaragd den Kämpfen der Gladiatoren zu. Später findet man wieder Nachrichten aus dem Anfange des 14. Jahrhunderts, wo die Brillen als eine neue Erfindung betrachtet wurden. Ein Florentiner Edelmann, Salvinus Armatus, gestorben 1317, wird in seiner Grabschrift als Erfinder der Brillen genannt[15]. Alexander de Spina, ein Mönch aus Pisa, gestorben 1313, soll ein Paar Brillen bei Jemandem gesehen haben, der ein Geheimniss daraus machte, solche nachgemacht und an viele Leute vertheilt haben[16]. Maurolycus (1494 bis 1575) versuchte später eine Erklärung der Wirkung zu geben, die aber entsprechend seiner Theorie vom Sehen unrichtig war. Er lässt nämlich die Sehestrahlen, d. h. Strahlen, von denen je einer von je einem Punkte des Objects ausgeht, durch die Gläser convergenter oder divergenter werden, so wie es in der That nur mit den von einem einzigen Punkte ausgegangenen Lichtstrahlen der Fall ist. Erst Kepler[17] gab die vollständige und richtige Theorie von dem Nutzen der Brillen.

Literatur.

1575. Fr. Maurolycus de lumine et umbra. Lib. III.

1583. J. B. Porta de refractione. Lib. VIII.

---

[1] Elem. Physiolog. V. 469.
[2] Dioptrica. Lugduni 1704. p. 112.
[3] Nützliche Versuche. III. 481.
[4] *Essay on vision.* London 1792.
[5] Uebersetzung des vorigen. Gotha 1794.
[6] Paralipomena. p. 200.
[7] Oculus. p. 37 u. 41. Aehnliche Versuche p. 32 u. 49.
[8] *Journal de Sçavans.* 1685 und in *Accidens de la vue*, 1693.
[9] Versuche und Abhandl. der Gesellschaft in Danzig. Bd. II. S. 290.
[10] *On the eye.* Vol. I. Book 3. Chapt. 3.
[11] Poggendorff Ann. XLII. 40.
[12] Prager Vierteljahrsschrift. 1851. Bd. IV. S. 92.
[13] *Essay on distinct and indistinct vision.* Smith's *Optics.* Cambridge 1738.
[14] L. XXXVII. c. 5.
[15] Volkmann's Nachrichten von Italien. B. I. S. 542. Die Grabschrift in der Kirche Maria maggiore zu Florenz wurde später weggenommen und hiess:

Qui giace Salvino degli Armati
Inventore degli Occhiali.
Dio gli perdoni le peccata.

[16] Smith's *Optics. Remarks* p. 12.
[17] Paralipomena. p. 200.

1604. J. KEPLER Paralipomena ad Vitellionem. p. 200.
1619. SCHEINER Oculus. p. 32—49.
1685. DE LA HIRE *Journal des Sçavans.* Ann. 1685. — *Accidens de la vue* 1693. §. II. (Folgerungen aus dem SCHEINER'schen Versuch.)
1709. DE LA HIRE *Mém. de l'Acad. de Paris.* An. 1709. p. 95 (Sehen im Wasser).
.... DE LA MOTTE Versuche und Abhandlungen der Gesellschaft in Danzig. Bd. II. S. 290. (Theorie des SCHEINER'schen Versuchs.)
1738. JURIN *Essay on distinct and indistinct vision in* SMITH *system of optics.* Cambridge 1738.
1759. PORTERFIELD *on the eye.* p. 389—423*. (Theorie des SCHEINER'schen Versuchs.)
1792. G. ADAMS *an essay on vision.* London. 2d. edition, übersetzt von F. KRIES. Gotha 1794. (Ausführlich über Brillen.)
1800. J. BISCHOFF praktische Abhandlung der Dioptrik. Stuttgardt. 2. Aufl. (Ueber Brillen.)
1801. TH. YOUNG *Philos. Transact.* P. I. p. 34. (Optometer.)
1810. GILBERT in seinen Annalen d. Physik. XXXIV. 34 u. XXXVI. 375. (Sehen im Wasser.)
.... WOLLASTON *Improved periscopic spectacles. Phil. Mag.* XVII. NICHOLSON's *Journal.* VII. 143. 241.
.... JONES *on* WOLLASTON's *spectacles.* NICHOLSON's *Journal.* VII. 192 u. VIII. 38.
1821. G. TAUBER Anweisung für auswärtige Personen, wie dieselben aus dem optisch-oculistischen Institute zu Leipzig Augengläser bekommen können. Leipzig. 3. Aufl.
1824. MUNCKE über Sehen unter Wasser. POGGENDORFF Ann. II. 257. GEHLER's pkysik. Wörterbuch, neu bearb. Leipzig 1828. Art. Gesicht. S. 1383—1386*. Ueber Brillen ebenda 1403—1410*.
1825. PURKINJE zur Physiologie der Sinne. II. S. 128*.
1830. HOLKE disquisitio de acie oculi dextri et sinistri in mille ducentis hominibus. Lipsiae.
1837. J. MILE in POGGEND. Ann. XLII. S. 51*.
1840. HENLE in J. MÜLLER's Lehrbuch der Physiologie. Bd. II. S. 339—341*.
1845. O. YOUNG's *optometer. Phil. Mag.* XXVI 436.
1850. J. CZERMAK Verhandl. d. Würzburger physik. Gesellschaft. Bd. I. S. 184.
1851. PEYTAL *Nouvel instrument à l'usage de la vue myope. Institut.* No. 841. p. 53. No. 857. p. 180.
H. MAYER Prager Vierteljahrsschrift für prakt. Heilkunde. XXXII. S. 92*.
v. HASNER ebenda. S. 166. (Optometer.)
1852. TH. RUETE Der Augenspiegel und das Optometer. Göttingen. S. 28*.
1854. JO. CZERMAK Wiener Sitzungsberichte. Bd. XII. S. 322*.

§. 12. Mechanismus der Accommodation.

Die Veränderungen, welche man bei Accommodationsänderungen am Auge eines Anderen beobachten kann, sind folgende:

1) Die Pupille verändert sich bei der Accommodation für die Nähe, erweitert sich bei der für die Ferne. Diese Veränderung ist leicht zu beobachten, und am längsten bekannt. Man bemerkt sie an jedem Auge, welches man abwechselnd einen nahen und einen in derselben Richtung fern liegenden Gegenstand betrachten lässt. Man hat nur darauf zu achten, dass die Pupille nicht durch zu starkes einfallendes Licht dauernd sehr verengt wird.

2) Der Pupillarrand der Iris und die Mitte der vorderen Linsenfläche verschieben sich bei eintretender Accommodation für die Nähe etwas nach vorn. Um dies zu beobachten, wähle man einen scharf bestimmten fernen Fixationspunkt, und stelle als näheren eine Nadelspitze hin. Der Beobachtete bedeckt das eine Auge, und bringt das andere in eine solche Stellung, dass die Nadelspitze ihm den ferneren Fixationspunkt genau deckt. Er muss darauf achten, dass sein Auge diese Stellung nicht verlässt, und darf es auch nicht auf seitlich liegende Gegenstände abschweifen lassen, weil es bei diesem Versuche wesentlich darauf ankommt, dass die Richtung des Auges nicht verändert wird. Der Beobachter stellt sich so, dass er die Hornhaut des beobachteten Auges von der Seite und

etwas von hinten sieht, und dass er die schwarze Pupille dieses Auges etwa noch zur Hälfte vor dem Hornhautrande der Sclerotica hervorragen sieht, so lange das beobachtete Auge in die Ferne sieht. Nun lasse er den näheren Gesichtspunkt, die Nadelspitze, fixiren; sogleich wird er bemerken, dass das schwarze Oval der Pupille und auch wohl ein Theil des ihm zugekehrten Irisrandes vor der Sclerotica sichtbar werden. *Fig. 53. a* stellt dar, wie das fernsehende Auge hierbei erscheint, *Fig. 53. b* das nahesehende. Die Veränderung in der Stellung des schwarzen Flecks wird am auffallendsten, wenn man auf die Breite des hellen Zwischenraums zwischen ihm und einem am vorderen Rande der Hornhaut erscheinenden dunkleren Streifen c_1 c_2 achtet. Dieser Streifen ist das durch die Brechung in der Hornhaut verzerrte Bild des über die Iris hervorragenden jenseitigen Randes der Sclerotica, des an seiner inneren Seite gewöhnlich beschattet ist, und daher dunkler als die von vorn erleuchtete Iris erscheint. Wenn die Accommodation für die Nähe eintritt, sieht man den Zwischenraum zwischen diesem Streifen c_1 c_2 und der dunklen Pupille schmaler werden. Verschöbe sich der Pupillarrand nicht nach vorn, so müsste beim Nahesehen dieser Zwischenraum umgekehrt breiter werden, weil sich die Pupille von allen Seiten gleichmässig verengert, und ebenso würde er breiter werden, wenn das Hervortreten der Pupille durch eine zufällige Wendung des beobachteten Auges gegen den Beobachter hin entstände. Indem man also auf den genannten Streifen achtet, kann man sich vor jeder Täuschung sichern. Dass die vordere Linsenfläche stets dicht hinter der Pupille bleibt, ist in §. 3 erwiesen.

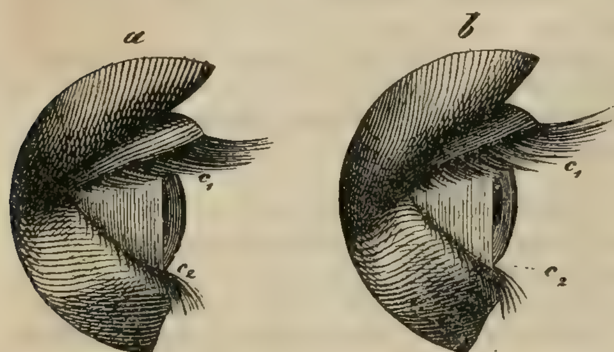


Fig. 53.

3) Die vordere Fläche der Krystallinse wird gewölbter beim Nahesehen, flacher beim Sehen in die Ferne. Man kann sich davon durch das an der vorderen Fläche der Linse zurückgeworfene Licht überzeugen. Man gebe, wie beim vorigen Versuche, dem beobachteten Auge wieder zwei scharf bestimmte, in einer Linie vor ihm liegende Gesichtspunkte. Das Zimmer muss vollständig verdunkelt sein, und ausser einer grossen und hellen Lampenflamme, welche man seitwärts von der Gesichtslinie in gleicher Höhe mit dem Auge aufstellt, darf sich kein grösserer heller Gegenstand vor dem beobachteten Auge befinden, um alle störenden Hornhautreflexe zu vermeiden. In *Fig. 54* sei *A* das beobachtete Auge, *C* die Flamme im Grundrisse, *n* der nähere, *f* der fernere Gesichtspunkt. Der Beobachter muss nun sein Auge in gleicher

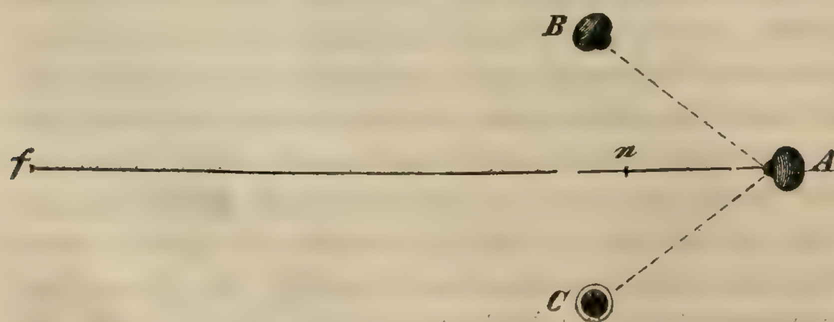


Fig. 54.

Höhe mit dem beobachteten Auge und der Lampe anbringen, so dass der Winkel *BAf* ungefähr gleich *CAf* ist, und so lange sein Auge in der Nähe von *B* hin und her bewegen, bis er die Reflexe von beiden Linsenflächen sieht. Diese beiden Reflexe *Fig. 55 b* und *c* sind sehr viel lichtschwächer als der Reflex der Hornhaut *a*. Der von der vorderen Linsenfläche *b* bildet ein aufrechtstehendes Bildchen der Flamme, etwas grösser als das von der Hornhaut entworfene, aber meist so verwaschen, dass man die Gestalt der Flamme nicht genau erkennen kann. Sein scheinbarer Ort ist weit (8 bis 12 Mm.) hinter der Pupille. Es verschwindet daher auch schon bei leichten Bewegungen des beobachteten Auges oder des Lichts hinter dem Irisrande. Wir wollen es das erste Linsenbild nennen, das von der hinteren Fläche entworfene dagegen das zweite. Dieses letztere *Fig. 55 c* ist umgekehrt und viel kleiner als das Hornhautbild und das erste Linsenbild, erscheint daher als ein helles, ziemlich gut begrenztes Pünktchen. Sein scheinbarer Ort ist nahe hinter der Fläche der Pupille, etwa 1 Mm. von ihr entfernt; es verschiebt sich daher verhältnissmässig wenig gegen die Pupille und das Hornhautbild, wenn der Beobachter die Stellung seines Kopfes ändert.



Fig. 55.

Wenn das beobachtete Auge sich für die Nähe accommodirt, wird das erste Linsenbild beträchtlich kleiner, und nähert sich in der Regel auch der Mitte der Pupille. Die Verkleinerung des Bildes bemerkt man am besten, wenn man statt einer Flamme einen Schirm mit zwei senkrecht über einander stehenden Oeffnungen angewendet hat, durch deren jede eine Flamme ihr Licht wirft, oder wenn man etwas unterhalb der einen Flamme einen horizontalen Spiegel anbringt, in dem sich die Flamme spiegelt. Das Spiegelbild der Flamme vertritt dann die zweite Flamme. Jedes der reflectirten Bilder besteht dann aus zwei lichten Stellen, und man sieht leicht und deutlich, wie die der vorderen Linsenfläche angehörigen sich einander nähern, wenn das Auge in die Nähe, aus einander treten, wenn es in die Ferne sieht. In *Fig. 56* stellt *A* die Reflexe beim Fernsehen, *B* beim Nahesehen dar; *a* ist der Reflex an der Hornhaut, *b* an der vorderen, *c* an der hinteren Linsenfläche. Als Lichtquelle sind zwei Flammen angenommen, welche durch rechtwinkelige Ausschnitte eines Schirms Licht senden.

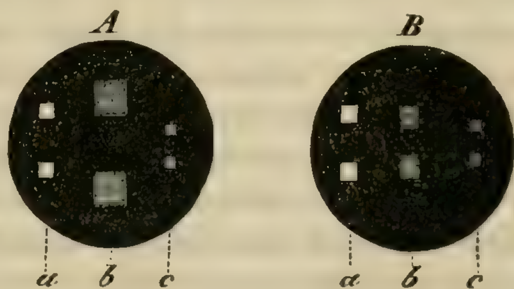


Fig. 56.

Da nun ein convexer Spiegel unter übrigens gleichen Umständen desto kleinere Bilder entwirft, je kleiner sein Radius, so folgt aus dieser Beobachtung, dass die vordere Fläche der Krystallinse bei der Accommodation für die Nähe sich stärker wölbt. Allerdings würde eine sehr geringe Verkleinerung des Spiegelbildchens auch wegen der Brechung der Strahlen in der Hornhaut entstehen, wenn die vordere Fläche der Krystallinse sich nur der Hornhaut näherte, ohne ihre Wölbung zu verändern. Doch ergiebt die Rechnung, dass die Verkleinerung des Bildchens aus dieser Ursache äusserst unbedeutend sein würde im Vergleich zu der wirklich beobachteten.

4) Auch das Spiegelbildchen, welches die hintere Fläche der Krystallinse entwirft, wird bei der Accommodation für die Nähe etwas kleiner. Um dies zu constatiren, muss man genauere Beobachtungsmethoden anwenden, welche im Anhange dieses Paragraphen beschrieben werden sollen. Durch eben solche Methoden findet man, dass der scheinbare (durch Linse und Hornhaut gesehene) Ort der hinteren Linsenfläche sich nicht merklich verändert. Da der scheinbare Ort der hinteren Linsenfläche sich nur sehr wenig von ihrem wirklichen Orte unterscheidet, und die Veränderungen der Cardinalpunkte des Auges bei Accommodationsveränderungen, wie unten gezeigt werden wird, der Art sind, dass sie einen sich wenigstens theilweis gegenseitig aufhebenden Einfluss auf diesen scheinbaren Ort ausüben würden, können wir annehmen, dass der wahre Ort der hinteren Linsenfläche bei der Accommodation sich nicht merklich ändert. Auch auf die Grösse des Spiegelbildchens der hinteren Linsenfläche üben die Veränderungen der Cardinalpunkte einen theilweis entgegengesetzten Erfolg aus. Doch lässt sich zeigen, dass auch bei den günstigsten Annahmen, welche für die Veränderungen der optischen Constanten möglicher Weise gemacht werden können, um die Verkleinerung des Bildchens beim Nahesehen zu erklären, die Verkleinerung nicht ganz so gross ausfallen könnte, als sie wirklich beobachtet wird. Daraus kann also geschlossen werden, dass jedenfalls auch die hintere Linsenfläche beim Nahesehen sich stärker wölbt, aber nur in geringem Grade.

Da somit den Beobachtungen nach die vordere Fläche der Linse vorrückt, die hintere ihren Ort nicht verlässt, wird die Linse beim Nahesehen in der Mitte dicker. Da sie andererseits ihr Volumen nicht verändern kann, müssen wir daraus schliessen, dass sich die Durchmesser ihrer Aequatorialebene verkürzen.

In dem Querschnitte des vorderen Theils des menschlichen Auges *Taf. I. Fig. 3* habe ich Hornhaut und Linse nach den Maassen eines der von mir untersuchten lebenden Augen in fünfmaliger Vergrösserung construirt, und zwar auf der mit *F* bezeichneten Seite in der Accommodation für die Ferne, auf der mit *N* bezeichneten in der für die Nähe. Die Ciliarfortsätze sind in dieser Figur so gezeichnet, als wenn man sie durch die zwischen sie eingeschobene Falte der Zonula hindurch sähe, so dass man den Verlauf der Zonula erkennt. Mit *a a* ist der vordere Rand ihrer Falten, mit *b b* der hintere bezeichnet.

Durch die stärkere Wölbung der Oberflächen der Linse wird ihre Brennweite verkürzt, während ihre Hauptpunkte sich gleichzeitig nach vorn verschieben, theils weil die vordere Fläche der Linse vorrückt, theils weil die vordere Fläche im Verhältniss zur hinteren sich stärker wölbt. Beide Umstände tragen dazu bei, die von der Hornhaut convergent auf die Linse fallenden Strahlen äusserer leuchtender Punkte eher zur Vereinigung zu bringen, als dies in dem fernsehenden Auge geschieht. Die Grösse der an der Linse beobachteten Veränderungen scheint auch auszureichen, um die Breite der Accommodation des lebenden Auges zu erklären.

Andere Veränderungen an den brechenden Theilen des Auges, welche auf die Accommodation bezogen werden könnten, sind bisher am Auge nicht nachgewiesen worden. Namentlich bleibt die Krümmung der Hornhaut durchaus unverändert. Dagegen wäre es möglich, dass zur Unterstützung der Accommodation

für die Nähe eine Verlängerung des Augapfels durch gleichzeitige Spannung aller sechs Augenmuskeln entstehen könnte. Doch ist bisher eine solche weder nachgewiesen, noch scheint sie nöthig zu sein, so wie auch meine in §. 2 berichteten Versuche dagegen sprechen, wonach bei verändertem Drucke im Auge die Krümmung der Hornhaut sich ändert, da doch bei der Accommodation keine Veränderung dieser Krümmung zu beobachten ist. Ausserdem ist dagegen geltend zu machen, dass schon ein geringer dauernder Druck auf das Auge die Blutmenge in den Gefässen der Netzhaut verringert und die Netzhaut selbst unempfindlich gegen das Licht macht.

Ueber die Art und Weise, wie die Formveränderung der Linse bewirkt wird, lässt sich noch nicht mit Sicherheit aburtheilen. Aeltere Forscher, wie Th. Young, nahmen an, dass die Linse aus Muskelfasern zusammengesetzt sei, und nannten sie deshalb *Musculus crystallinus*. Allein wenn die Fasern der Linse auch möglicher Weise mit Muskelfasern verglichen werden könnten, deren man gegenwärtig äusserst verschiedenartige Formen kennt, so gehen doch keine Nerven zu ihr hin, deren Dasein in den durchsichtigen Gebilden, um die es sich hier handelt, kaum hätte den Beobachtern entgehen können. Ausserdem sind bisher alle Versuche missglückt, an frischen thierischen Linsen durch intermittirende elektrische Ströme, welche alle bekannten muskulösen Gebilde in Zusammenziehung versetzen, Formveränderungen hervorzubringen. Dergleichen Versuche sind unter Anderen von Cramer[1] angestellt worden an Augen von frisch getödteteten Seehunden und Vögeln, welche die Formveränderung der Linse noch zeigten, so lange die Iris und der Ciliarapparat unverletzt waren, während die freigelegte Linse sich niemals veränderte. Ich selbst habe mit v. Wittich dergleichen Versuche an Linsen frisch getödteter Kaninchen und Frösche vorgenommen mit demselben negativen Erfolge.

Dagegen hat Cramer[1] gefunden, dass Accommodationsveränderungen an ausgeschnittenen Augen hervorgebracht werden können, wenn man durch den vorderen Theil des Auges intermittirende elektrische Ströme gehen lässt. Die Versuche sind folgende: Auf den Objecttisch eines Mikroskops mit ebenem Beleuchtungsspiegel wurde ein passender hölzerner Ring, und auf diesen, die Hornhaut nach unten, das Auge eines kurz zuvor durch Erhängung getödteten, 5 Wochen alten Seehunds (*Phoca littorea*) gelegt. Der Augapfel war von Muskeln, Fett und anderen umgebenden Theilen frei gemacht, und an seiner hinteren Seite ein Theil der Sclerotica, Chorioidea und Netzhaut sorgfältig, ohne Verletzung des Glaskörpers, abpräparirt. Bei richtiger Stellung des Mikroskops und seines Spiegels konnte Cramer nun das Bild einer etwa 35 Centimeter entfernten Kerzenflamme sehr deutlich auf der Hinterfläche des Glaskörpers abgebildet wahrnehmen mit 80maliger Vergrösserung. Sobald der Strom eines magnetelektrischen Rotationsapparates an zwei Seiten der Hornhaut eingeleitet wurde, wurde das Bild undeutlicher und breiter.

Alsdann stiess Cramer eine Staarnadel an dem Rande der Hornhaut ein, führte ihre Spitze durch die Pupille hinter die Iris, und durchschnitt beim Zurück-

[1] Het Accommodatievermogen. p. 58 u. 86.

ziehen die Iris, so dass diese eine radicale Spalte bekam, die von ihrem Ansatze bis zur Pupille ging. Danach brachte der elektrische Strom keine Veränderung des Bildchens mehr hervor.

An Augen von Hunden und Kaninchen gelangen diese Versuche nicht, weil unmittelbar nach dem Tode die Pupille sich beträchtlich verengerte, und stärkere elektrische Ströme die Linse (wahrscheinlich durch Elektrolyse) undurchsichtig machten.

An Augen von Tauben fand er, dass bei Einwirkung elektrischer Ströme sich das Bild der vorderen Linsenfläche veränderte, nicht aber das Hornhautbildchen. Die Veränderung des ersteren konnte an solchen ausgeschnittenen Augen noch besser beobachtet werden, nachdem die Hornhaut weggenommen war. Die stärkere Krümmung der Linse dauerte, so lange die Ströme des Inductionsapparates einwirkten, und verschwand nachher wieder. Sie trat nicht mehr ein, so bald die Iris fortgenommen wurde.

Cramer schliesst hieraus, zunächst dass die Form der Linse durch contractile Theile, welche im Auge selbst liegen, verändert werde, und ferner betrachtet er die Iris speciell als dasjenige Organ, welches diese Veränderung hauptsächlich hervorbringe. Er schreibt der Iris eine beträchtliche Wölbung zu, indem er ihren Ursprung auf die innere Fläche des *Musculus ciliaris,* weiter zurückverlegt, als es bisher die Anatomen gethan hatten. Bei der Accommodation des Auges für die Nähe sollen sich nach seiner Annahme gleichzeitig die Kreis- und Radialfasern der Iris verkürzen. Erstere gäben dadurch den letzteren auch an ihrem centralen Ende einen festen Anheftungspunkt, und die gespannten radialen Fasern übten nun auf die hinter ihnen liegenden Theile (Rand der Linse und Glaskörper) einen Druck aus, welcher bewirkte, dass der mittlere Theil der sehr nachgiebigen elastischen Linse durch die Pupille, wo allein kein Druck auf die Linse stattfände, herauszuquellen strebte, und so die stärkere Wölbung bekäme. Durch die Zusammenziehung des Ringmuskels der Pupille, welche nothwendig ist, um den radialen Fasern der Iris am inneren Ende einen Widerhalt zu geben, würde sich dann auch die beim Nahesehen eintretende Verengerung der Pupille erklären.

Donders machte darauf aufmerksam, dass das an der inneren Wand des *Canalis* Schlemmii gelegene elastische Gewebe, an welches sich die Peripherie der Iris zunächst anheftet, von Bedeutung für den Accommodationsvorgang sein könnte. Da die Iris und der Ciliarmuskel zusammen von dieser Wand des Kanals entspringen, und die Fasern des Muskels nach rückwärts verlaufen, um sich an die Aderhaut festzusetzen, so wird durch eine Zusammenziehung des Muskels, wenn man die Aderhaut als seinen festen Ansatzpunkt betrachtet, das elastische Gewebe in der Wand des Schlemm'schen Kanals gedehnt, und der Ansatz der Iris nach hinten gezogen werden können, wodurch sie in eine günstigere Lage kommt, um auf die hinter ihr liegenden Theile einen Druck ausüben zu können.

In der That ist leicht einzusehen, dass die peripherischen Theile der Iris zurückweichen müssen, wenn die Mitte der Linse und der Pupillarrand der Iris sich nach vorn bewegen. Denn das Volumen der wässrigen Feuchtigkeit, welche in der vorderen Augenkammer eingeschlossen ist, ist unveränderlich; wenn ihr

durch das Vordringen der Linse in der Mitte Raum genommen wird, muss dieser an den Seiten wieder gewonnen werden, dadurch dass die peripherischen Theile der Iris zurückweichen.

Cramer hat bemerkt, dass man bei Kindern mit blossem Auge beobachten könne, wie sich die vordere Kammer beim Nahesehen erweitert. Ich selbst habe gefunden, dass man dies auch bei Erwachsenen mittels einer besonderen Art der Beleuchtung des Auges erkennen könne. Wenn man nämlich Licht ganz von der Seite her auf das Auge fallen lässt, so dass die Iris grösstentheils beschattet ist, so bildet sich bei einer richtigen Stellung des Auges auf der dem Lichte gegenüberliegenden Seite der Iris ein gekrümmter heller Streifen, eine kaustische Linie. In *Fig. 57* ist in der unteren Hälfte der Gang der gebrochenen Strahlen für eine Kugel von dem Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit dargestellt, auf welche parallele Strahlen fallen. *F* sei der Brennpunkt der Centralstrahlen. Die Randstrahlen weichen erheblich von dem Brennpunkte der Centralstrahlen ab, und schneiden sich mit den nächst benachbarten Strahlen in einer kaustischen Fläche, deren Durchschnitt durch die Curven *G F* angegeben ist. Der äusserste Strahl ist *C B*, er wird gebrochen nach *B H*; in dem Halbirungspunkte der Sehne des Kreises, welche der gebrochene Strahl bildet, in *G*, ist das Ende der kaustischen Linie *G F*. Nun denke man sich im Inneren der brechenden Kugel Ebenen gelegt, die ähnlich der Iris in der wässrigen Feuchtigkeit liegen. Legen wir eine solche Ebene senkrecht zur Ebene der Zeichnung durch $q_0\ P_0$, so wird ihre ganze Vorderfläche vom Lichte getroffen und beleuchtet werden. Legen wir die Ebene durch $q_1\ P_1$, so liegt ein Theil derselben vor dem äussersten gebrochenen Strahle *B G*, dieser wird beleuchtet werden; ein anderer liegt dahinter und bleibt dunkel. Legen wir die Ebene durch $q_2\ P_2$, so schneidet sie die kaustische Fläche. Es bleibt wieder ein Theil hell, einer dunkel, aber die Grenze zwischen dem beleuchteten und nicht beleuchteten Theile wird jetzt durch eine helle Linie bezeichnet, welche der Linie entspricht, in welcher die Ebene $q_2\ P_2$ die kaustische Fläche schneidet. Aus der Figur ist leicht ersichtlich, dass, wenn der Theil der Fläche $q_2\ P_2$, welcher die kaustische Fläche schneidet, sich rückwärts bewegt, also von der brechenden Fläche entfernt, die helle Linie dem Rande näher rücken muss.

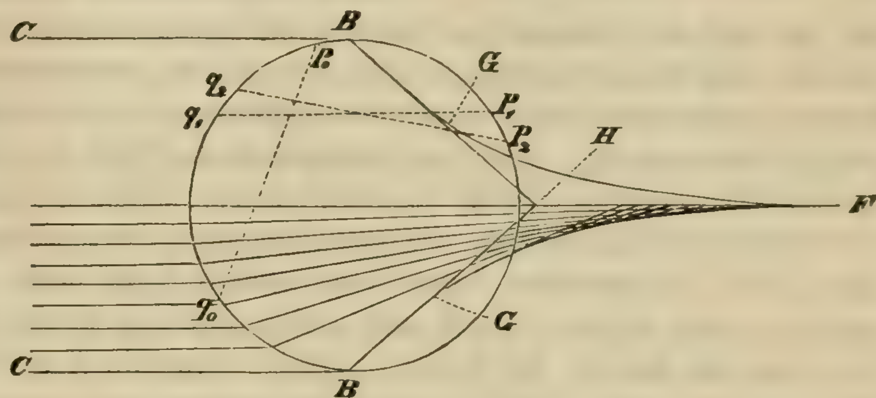


Fig. 57.

Dies kann man nun an der Iris beobachten, wenn sich das Auge für die Nähe accommodirt. Beleuchtet man das Auge eines Anderen, welcher abwechselnd einen näheren und ferneren Fixationspunkt betrachtet, die sich genau decken, so von der Seite, dass die kaustische Linie nahe am Ciliarrande der Iris er-



Fig. 58.

scheint, so sieht man sie bei der Accommodation für die Nähe sich dem Rande nähern, bei der für die Ferne sich davon entfernen. In *Fig. 58* ist diese Beleuchtung der Iris dargestellt; das Licht fällt von der Seite in der Richtung des Pfeils auf das Auge: auf der Iris sieht man an der dem Lichte zugekehrten Seite *b* den Hornhautreflex des Lichts, auf der anderen nach *a* hin die kaustische Linie, deren Licht zum Theil noch durch den vorspringenden Rand der Sclerotica hindurchscheint.

Nach Cramer's und Donders' Annahme würden die Iris und der Ciliarmuskel dadurch die Gestaltänderung der Linse bewirken, dass sie den Druck im Glaskörper und auf die Randtheile der Linse erhöhen, wobei nur die Mitte ihrer vorderen Fläche hinter der Pupille von dem erhöhten Drucke befreit bleibt. Auch kann dadurch in der That die vermehrte Wölbung der vorderen Linsenfläche, welche Cramer zunächst beobachtet hatte, erklärt werden.

Die Gestaltveränderung der Linse dagegen, welche aus meinen Messungen sich ergiebt, möchte sich, ohne eine andere Kraft noch zu Hülfe zu nehmen, nicht erklären lassen. Durch den hydrostatischen Druck, der auf die hintere Seite und die Ränder der Linse einwirkt, kann diese nicht wohl in der Mitte dicker werden. Ein solcher Druck würde streben, die Aequatorialebene der Linse nach vorn zu wölben, und dabei ihre hintere Seite flacher zu machen.

Eine Annahme, welche diese Schwierigkeit zu beseitigen geeignet erscheint, ist die, dass die Linse im ruhenden, fernsehenden Zustande des Auges durch die an ihren Rand befestigte Zonula gedehnt wird. Die Falten der Zonula laufen von ihrem Ansatz an der Linsenkapsel nach aussen und hinten, wobei sie Scheiden für die Ciliarfortsätze bilden, und verschmelzen endlich am hinteren Ende dieser Fortsätze und des Ciliarmuskels mit der Glashaut, Netzhaut und Aderhaut. Wenn der Ciliarmuskel sich zusammenzieht, kann er das hintere Ende der Zonula nach vorn der Linse nähern und die Spannung der Zonula vermindern. Durch die gespannte Zonula muss aber die Linse nach ihren Aequatorialdurchmessern gedehnt, in der Axe verkürzt, ihre Flächen müssen flacher gemacht werden. Wenn der Zug der Zonula bei der Accommodation für die Nähe nachlässt, wird die Aequatorialfläche der Linse kleiner, ihre Mitte dicker werden, beide Flächen werden sich stärker wölben. Kommt dazu nun noch der Druck der Iris, so wird diese die Aequatorialebene der Linse nach vorn wölben, und dadurch wird die Wölbung der vorderen Fläche verstärkt, die der hinteren vermindert werden, so dass sie der ursprünglichen Wölbung der fernsehenden Linse wieder nahehin gleich werden kann.

Auf diese Weise scheint sich die Gestaltänderung der Linse erklären zu lassen. Uebrigens ist es an todten Augen leicht, durch Zerren an der Zonula Gestaltveränderungen der Linse hervorzubringen. Hiermit würde auch der Umstand in Verbindung stehen, dass ich an lebenden fernsehenden Augen die Linsendicke geringer gefunden habe, als sie an todten Linsen je gefunden wird. Von einer Aufquellung der todten Linsen durch Wasser kann dieser Unterschied wohl

kaum hergeleitet werden, da nach den Beobachtungen von W. KRAUSE die Brechungsverhältnisse der äusseren, mittleren und innersten Schichten von Kalbslinsen 24 Stunden nach dem Tode genau dieselben sind, wie unmittelbar nach dem Tode, während man bei einer Wasseraufnahme eine Verminderung des Brechungsvermögens erwarten müsste.

Um eine Uebersicht über die wahrscheinliche Veränderung der optischen Constanten und Cardinalpunkte des Auges zu geben, welche bei der Accommodation für die Nähe eintritt, und zugleich nachzuweisen, dass die beobachtete Aenderung der Form der Linse genügend ist, die Accommodation zu erklären, habe ich für zwei Accommodationen eines schematischen Auges, welches den von mir untersuchten nahehin entspricht, die optischen Constanten berechnet. Das fernsehende Auge unterscheidet sich von LISTING's schematischem Auge nur dadurch, dass die Linsenflächen etwas nach vorn gerückt und die Linse dünner angenommen ist. Das Brechungsvermögen der wässrigen und gläsernen Feuchtigkeit habe ich, wie LISTING, gleich $\frac{103}{77}$, das der Krystallinse gleich $\frac{16}{11}$ genommen. Die Längen sind in Millimetern gemessen. Als **Ort** eines Punktes ist seine Entfernung von der vorderen Hornhautfläche angegeben.

	Accommodation für Ferne.	Accommodation für Nähe.
Angenommen:		
Krümmungsradius der Hornhaut	8,0	8,0
Desgl. der vorderen Linsenfläche	10,0	6,0
Desgl. der hinteren Linsenfläche	6,0	5,5
Ort der vorderen Linsenfläche	3,6	3,2
Ort der hinteren Linsenfläche	7,2	7,2
Berechnet:		
Vordere Brennweite der Hornhaut	23,692	23,692
Hintere desgl.	31,692	31,692
Brennweite der Linse	43,707	33,785
Abstand des vorderen Hauptpunktes der Linse von der vorderen Fläche	2,1073	1,9745
Abstand des hinteren von der hinteren	1,2644	1,8100
Abstand der beiden Hauptpunkte der Linse von einander	0,2283	0,2155
Hintere Brennweite des Auges	19,875	17,756
Vordere desgl.	14,858	13,274
Ort des vorderen Brennpunktes	—12,918	—11,241
Ort des ersten Hauptpunktes	1,9403	2,0330
Ort des zweiten Hauptpunktes	2,3563	2,4919
Ort des ersten Knotenpunktes	6,957	6,515
Ort des zweiten Knotenpunktes	7,373	6,974
Ort des hinteren Brennpunktes	22,231	20,248

Nimmt man an, dass bei der Accommodation für die Ferne dieses schematische Auge in unendliche Ferne blicken könne, so würde die Netzhaut in der Axe des Auges 22,231 Mm. von der vorderen Hornhautfläche entfernt sein, und bei dem anderen berechneten Accommodationszustande ein Gegenstand deutlich gesehen werden, welcher 118,85 Mm. vor dem vorderen Brennpunkte, oder 130,09 Mm. vor der Hornhaut liegt. Es würde dies der Accommodationsbreite eines normalen Auges gut entsprechen.

Veränderungen der Hornhautkrümmung wollten einige ältere Beobachter [1] bei ungenaueren Untersuchungsmethoden gefunden haben. Neuere genauere Messungen dieser Krümmung mit Hülfe der reflectirten Bilder haben ergeben, dass sie ganz unverändert bleibt. Solche sind von Senff [2], Cramer [3] und mir selbst angestellt worden. Das Ophthalmometer lässt eine sehr genaue Ausführung dieser Versuche zu, wobei Aenderungen der Radius um $1/_{200}$ seiner Grösse wahrzunehmen sein würden, während ein Wechsel der Sehweite zwischen 5 Zoll und unendlicher Entfernung einen Wechsel des Krümmungshalbmessers von 6,8 bis 8 Mm. erfordern würde, wenn eine solche Veränderung die Accommodaiion bewirken sollte. Ich habe aber durchaus negative Resultate erhalten. Zu erwähnen ist hier noch ein sehr sinnreicher Versuch von Th. Young, welcher dasselbe beweist. Er beschreibt ihn folgendermassen: „Ich nehme aus einem kleinen botanischen Mikroskope eine biconvexe Linse von $8/_{10}$ (Zoll) Radius und Brennweite, befestigt in einer beckenförmigen Fassung von $1/_5$ Zoll Tiefe, und mache ihre Kante mit Wachs wasserdicht. Ich tröpfle ein wenig mässig kaltes Wasser hinein, bis es zu drei Vierteln damit angefüllt ist, und bringe es dann an das Auge, so dass die Hornhaut in das Becken hineinragt und überall mit dem Wasser in Berührung ist. Mein Auge wird dadurch sogleich weitsichtig und das Brechungsvermögen der Glaslinse, welches durch das Wasser etwa auf 1,6 (Zoll) Brennweite zurückgeführt ist, ist nicht hinreichend, die Stelle der Hornhaut zu vertreten, welche durch das Wasser unwirksam geworden ist; aber die Hinzufügung einer anderen Linse von $5\,1/_2$ Zoll Brennweite bringt mein Auge zu seinem natürlichen Zustande zurück, und noch etwas darüber hinaus. Ich wende dann das Optometer an, und finde dieselbe Ungleichheit in der horizontalen und verticalen Brechung, wie ohne Wasser, und ich habe in beiden Richtungen eine Accommodationsfähigkeit bis zu einer Sehweite von 4 Zollen wie vorher. Im ersten Augenblicke erschien mir die Accommodation allerdings etwas geringer und nur im Stande, das Auge von dem für parallele Strahlen geeigneten Zustande zu einer Sehweite von 5 Zoll zu bringen, und diess liess mich glauben, dass die Hornhaut eine kleine Wirkung im natürlichen Zustande haben könnte; indem ich aber überlegte, dass die künstliche Hornhaut ungefähr $1/_{10}$ Zoll vor der Stelle der natürlichen Hornhaut sich befand, berechnete ich die Folgen dieses Unterschiedes und fand ihn genau ausreichend, um die Verringerung des Spielraums der Sehweite zu erklären.“

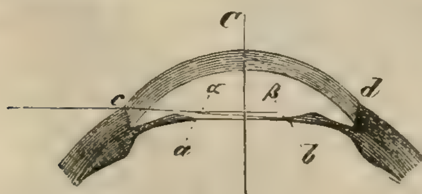


Fig. 59.

Um wie viel sich beim Nahesehen der Pupillarrand der Iris nach vorn verschiebt, lässt sich wenigstens annähernd bestimmen, nachdem man die Dimensionen und Krümmung der Hornhaut und die Entfernung der Pupillenfläche von der Hornhaut bestimmt hat. Es sei *C Fig. 59* die Hornhaut, *c* und *d* ihr äusserer Rand, *a b* die Pupille beim Fernsehen. Hat sich nun der Beobachter gegen dieses Auge

[1] J. P. Lobé Diss. de oculo humano. Lugd. Batav. 1742. p. 119. — Home *Philos. Transact.* 1796. p. 1.
[2] Wagner Handwörterbuch der Physiologie. Art. Sehen.
[3] Het Accommodatievermogen der Oogen. Harlem 1853. p. 45.

so gestellt, dass ihm die ganze Pupille gerade verdeckt wird, so muss *cb* die Gesichtslinie des Beobachters in der wässrigen Feuchtigkeit sein. Wird nun beim Nahesehen die ganze Pupille vor dem Rande der Sclerotica eben sichtbar, und kennt man ihre Breite $\alpha\beta$, so muss sie ganz vor der Linie *cb* liegen, und doch an diese anstossen, so wie in *Fig.* 54 angegeben ist, und dadurch findet man wenigstens angenähert die Grösse ihrer Verschiebung. Diese betrug unter den von mir untersuchten Augen bei dem Auge *O. H.* 0,36 Mm., bei dem Auge *B. P.* 0,44 Mm. Tritt die Pupille beim Nahesehen nicht ganz vor, sondern nur die Hälfte, zwei Drittel u. s. w. derselben, so muss man die Grösse des hervortretenden Theils schätzen und danach die Berechnung anstellen.

Der Krümmungsradius der vorderen Fläche der Linse kann mit Hülfe der von ihr entworfenen Spiegelbilder gemessen werden. Doch sind diese Bilder zu lichtschwach und verwaschen, als dass man eine genaue Messung ihres Abstandes mit dem Ophthalmometer ausführen könnte. Wenn man dagegen neben dem Linsenspiegelbild ein Hornhautspiegelbild von veränderlicher Grösse erzeugt, so kann man die Grösse beider Bilder leicht mit blossem Auge vergleichen und sie gleich gross machen. Die Grösse des Hornhautbildes findet man dann leicht durch Messung oder Rechnung. So liess ich z. B. zwei vertical über einander stehende helle Flammen von der Linse spiegeln, zwei kleinere schwächere Flammen von der Hornhaut, stellte die letzteren so, dass ihre Spiegelbilder dicht neben den Linsenspiegelbildern der grossen Flammen erschienen, und deren gegenseitiger Abstand dem der letzteren gleich wurde. Statt eines jeden Paars von Flammen kann man auch bequemer eine Flamme und ihr von einem horizontalen Spiegel entworfenes Spiegelbild gebrauchen [1].

So mass ich also die Grösse der von der vorderen Linsenfläche beim Nahesehen und beim Fernsehen entworfenen Bilder. Es fand sich, dass in gut accommodirenden Augen das von der vorderen Linsenfläche entworfene Bild beim Nahesehen etwa nur $^5/_9$ der Grösse hat, welche ihm beim Fernsehen zukommt. Dies Bild wird von einem aus einer brechenden und einer spiegelnden Fläche zusammengesetzten optischen Systeme entworfen. Die Brennweite dieses Systems kann man zunächst aus der Grösse des Bildes, Grösse und Entfernung des Objects nach §. 9 Gleichung 8b) berechnen, welche auch für spiegelnde Systeme gilt, aus der Brennweite dann den Radius der spiegelnden Fläche. Es sei f_1 die erste, f_2 die zweite Brennweite des brechenden Systems, welches vor der spiegelnden Fläche liegt, r der Krümmungsradius dieser Fläche, positiv gerechnet, wenn sie concav, negativ, wenn sie convex ist, d der Abstand des Scheitels der spiegelnden Fläche vom zweiten Hauptpunkte des brechenden Systems, so ist die Brennweite des zusammengesetzten spiegelnden Systems:

$$q = \frac{f_1 f_2 r}{2(f_2 - d)(f_2 - d + r)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1).$$

Nach dieser Formel wird q kleiner, wenn d kleiner wird, d. h. wenn die vordere Linsenfläche der Hornhaut näher rückt. Wenn q kleiner wird, wird auch das Spiegelbild entfernter Gegenstände in demselben Verhältnisse kleiner. Da jedoch die Veränderung von d etwa nur 0,4 Mm. beträgt, und $f_2 - d$ etwa 28 Mm., $f_2 - d + r$ etwa 38 Mm., so ist die Veränderung von q höchst gering und beträgt etwa nur $^1/_{40}$ seiner Grösse, während die directe Beobachtung der Bilder etwa $^4/_9$ giebt. Die Verkleinerung der Bilder kann also nicht durch das Verschieben der vorderen Linsenfläche, sondern in der That nur durch vermehrte Krümmung dieser Fläche erklärt werden.

Durch die Beobachtung an lebenden Augen ergab sich in dieser Weise

Auge.	Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche		Verschiebung der Pupille bei Accommodation für die Nähe.
	fernsehend.	nahsehend.	
O. H.	11,9	8,6	0,36
B. P.	8,8	5,9	0,44
J. H.	10,4		

[1] GRAEFE's Archiv für Ophth. Bd. I. Abth. 2. S 45.

Um die Krümmungsradien der vorderen Linsenfläche nach der obigen Gleichung berechnen zu können, muss man den Krümmungsradius der Hornhaut und die Entfernung der vorderen Linsenfläche (Pupille) von der Hornhaut kennen. Beide Grössen waren an den angeführten Augen schon vorher gemessen.

Das Spiegelbild, welches die hintere Linsenfläche von fernen Gegenständen entwirft, verändert seine Grösse ebenfalls bei geänderter Accommodation des Auges, aber in sehr unbedeutendem Grade. Ich beobachtete diese Veränderung durch das Ophthalmometer, indem ich zwei Flammen senkrecht über einander seitlich vom Auge hinter den Oeffnungen eines Schirms aufstellte und deren von der hinteren Linsenfläche gespiegelte Bilder beobachtete. Ich stellte die Doppelbilder der beiden Lichter, so wie *Fig. 60* zeigt, neben einander. Hier sind a_0 und a_1 die Doppelbilder des unteren, b_0 und b_1 die des oberen Lichts. Die einander genäherten Bilder a_1 und b_0 deckten sich nicht, sondern standen dicht neben einander, so dass ich sie gesondert erkennen konnte. Bei der Accommodation für die Nähe verschob sich b_0 etwas in der Richtung nach a_0 und a_1 in der Richtung nach b_1 hin. Ich schätzte die Breite der Verschiebung etwa gleich der Hälfte der Breite eines jeden lichten Flecks, und da die Entfernung der Mittelpunkte der Oeffnungen, durch welche das Licht fiel, gleich sechsmal der Breite der Oeffnungen war, so war die Verkleinerung des Bildes etwa $1/_{12}$ seiner Grösse.

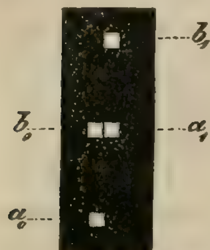


Fig. 60.

Endlich suchte ich noch zu ermitteln, ob die hintere Linsenfläche sich bei der Adaptation für die Nähe in der Richtung von hinten nach vorn verschöbe. Ich verfuhr dabei in derselben Weise, wie ich die scheinbare Entfernung der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut bestimmt hatte. Bei derselben Anordnung des Apparates untersuchte ich, ob der Lichtreflex der hinteren Linsenfläche bei veränderter Adaptation und unveränderter Richtung der Augenaxe seinen Platz änderte, wobei abwechselnd das Fernrohr rechts und das Licht links, dann wieder das Fernrohr links und das Licht rechts stand. Indessen habe ich keine Ortsveränderung dieses Bildchens bemerken können. Die scheinbare Entfernung der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut wird also bei den Adaptationsveränderungen nicht merklich verändert.

Was dürfen wir nun aus diesen Veränderungen des Spiegelbildchens und des scheinbaren Ortes der hinteren Linsenfläche auf die wirklichen Veränderungen derselben für Schlüsse ziehen? Der scheinbare Ort dieser Fläche wird durch die Brechung in der Linse überhaupt sehr wenig geändert, da sie dem hinteren Knotenpunkte der Linse ziemlich nahe liegt, und wir können daraus schliessen, dass auch die Unterschiede ihrer Verschiebung durch die Brechung bei verschiedenen Accommodationszuständen des Auges jedenfalls so klein sein werden, dass wir sie vernachlässigen können. So wird z. B. in den beiden schematischen Augen, deren optische Constanten wir in diesem Paragraphen als Beispiel berechnet haben, in dem fernsehenden Auge die hintere Linsenfläche scheinbar um 0,191 Mm., in dem nahesehenden um 0,113 Mm. nach vorn verschoben, würde also, während sie in Wirklichkeit an ihrer Stelle bleibt, sobald das Auge sich für die Nähe accommodirt, scheinbar um 0,088 Mm. nach hinten rücken. Dies ist aber zu wenig, um wahrgenommen zu werden. Uebrigens kann diese Rechnung eben nur dazu dienen, zu zeigen, dass die Verschiebungen und ihre Unterschiede überhaupt klein sind, keineswegs um den Sinn dieses Unterschiedes in der wirklichen Krystallinse zu zeigen, weil hierbei wesentlich die Entfernung der Hauptpunkte der Linse von einander in Betracht kommt, welche in der Krystallinse jedenfalls geringer ist als in den schematischen homogenen Linsen.

Wir können also nur sagen, dass der wahre Ort der hinteren Linsenfläche bei den Accommodationsänderungen nicht merklich geändert werde.

Um zu ermitteln, wie das von der hinteren Linsenfläche entworfene Spiegelbild sich bei Aenderungen der Augenmedien verändere, denken wir uns die spiegelnde Fläche durch eine unendlich dünne Schicht Glaskörper von der letzten brechenden Fläche des Auges getrennt. Dann können wir für die Cardinalpunkte des brechenden Systems die Cardinalpunkte des Auges nehmen. Es sei n das Brechungsverhältniss des Glaskörpers; ferner nennen wir p die Entfernung des hinteren Brennpunktes des Auges von der hinteren Linsenfläche nach hinten gerechnet, ε die des zweiten Knotenpunktes des Auges von derselben Fläche nach vorn ge-

rechnet. In der Gleichung 1), welche die Brennweite eines zusammengesetzten brechenden und spiegelnden Systems giebt, haben wir zu setzen

$$f_1 = p + \varepsilon$$
$$f_2 = n\,(p + \varepsilon)$$
$$f_2 - d = p.$$

Dann wird der Werth der Brennweite des brechenden und spiegelnden Systems:

$$q = \frac{n\,r}{2} \cdot \frac{(p+\varepsilon)^2}{p\,(p+r)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2).$$

Bei der Accommodation für die Nähe wird ε jedenfalls grösser, weil bei der Gestaltveränderung der Linse die Knotenpunkte des Auges vorrücken müssen; dadurch würde auch, wenn sich r und p gar nicht veränderten, der Werth von q und die Grösse des Spiegelbildes zunehmen müssen. Dagegen wird p bei der Accommodation für die Nähe kleiner, und dadurch kann der Werth von q auch kleiner werden, unter den Verhältnissen dieser Grössen im Auge. Differentiirt man q nach p, so erhält man

$$\frac{d\,q}{d\,p} = \frac{n\,r}{2} \cdot \frac{p+\varepsilon}{p^2\,(p+r)^2}\,[p\,r - (2p + r)\,\varepsilon].$$

Von den Factoren dieses Ausdrucks kann nur der letzte, in der eckigen Klammer eingeschlossene negativ werden, wird es aber wohl im normalen Auge nicht, da ε gegen p und r sehr klein ist. Es wird also $\frac{d\,q}{d\,p}$ positiv sein, d. h. q wird mit p zugleich grösser und kleiner werden. Es würde also bei der Accommodation für die Nähe, wobei p kleiner wird, wenn wir vorläufig von der Veränderung von ε absehen und r constant setzen, auch q und das Spiegelbild der hinteren Linsenfläche kleiner werden können, und man könnte vermuthen, die beobachtete Verkleinerung dieses Bildes sei dadurch hervorgebracht. Die Rechnung nach der Gleichung 2) indessen ergiebt das Gegentheil. Nehmen wir aus LISTING's schematischem Auge die Werthe $p = 14{,}647$, $\varepsilon = 0{,}3601$, $r = 6$, so würde p auf 10,597 verkleinert werden müssen, um q um $^1/_{12}$ seines Werthes zu verringern. Der hintere Brennpunkt des Auges müsste also 4 Mm. vor die Netzhaut rücken, was jedenfalls schon die mögliche Veränderung der Lage dieses Punktes überschreitet. Aber da ein Theil der hierdurch bewirkten Verkleinerung des Bildes durch das Vorrücken der Knotenpunkte, die Vergrösserung von ε, wieder aufgehoben werden würde, wie vorher auseinandergesetzt ist, so können wir nicht zweifeln, dass die Verkleinerung des Bildchens auf der hinteren Linsenfläche ohne eine, wenn auch geringe Vermehrung der Krümmung dieser Fläche nicht die beobachtete Grösse haben könne.

Berechnet man die Brennweiten q für die beiden schematischen Augen dieses Paragraphen, so findet man für das fernsehende 5,6051, für das nahesehende 5,3562, welche Grössen nur um $^1/_{21}$ ihres Werthes unterschieden sind, während die dazu gehörigen Krümmungsradien (6 und 5,5 Mm.) um $^1/_{12}$ differiren. Hier verdeckt also die Aenderung der brechenden Mittel die des Krümmungsradius zum Theil, und lässt sie kleiner erscheinen, als sie wirklich ist. Wir schliessen daraus, dass die hintere Fläche der Linse bei der Accommodation für die Nähe sich stärker wölbt.

Für den Mechanismus der Accommodation ist es wichtig, den Ursprung der Iris genau zu kennen. Ich habe den *Canalis* SCHLEMMII mit Umgebung, wie er sich auf feinen Querschnitten der Augenhäute darstellt, in *Taf. I. Fig. 2* abgebildet. *A* ist der Querschnitt des Kanals, der wohl auch im lebenden fernsehenden Auge eine längliche Spalte bildet, *C* die Cornea, *S* die Sclerotica, *D* die Bindehaut, *B* die Aderhaut, *E* ein Ciliarfortsatz, *J* die Iris. Die innere Wand des Kanals ist aus verschiedenen Geweben zusammengesetzt. Der hinterste Theil dieser Wand bei *a* besteht ganz deutlich aus demselben Gewebe eng durchflochtener Sehnenfasern wie die Sclerotica, von der er ausgeht. Der vordere Theil besteht dagegen aus einem anderen Gewebe, welches undurchsichtiger ist als das Sehnengewebe, aus stärker sich abzeichnenden, gegen Essigsäure und Kali sehr resistenten Fasern besteht, und daher wohl für elastisches Gewebe zu halten ist. Nach vorn schiebt es sich zwischen *Membrana* DESCEMETII und die Knorpelsubstanz der Hornhaut ein, nach hinten heftet es sich theils an den hinteren

sehnigen Theil der Wand, theils verbindet es sich mit den Faserzügen des Spannmuskels der Aderhaut. Das System der Aderhaut hängt nur mit der hinteren Hälfte der inneren Wand des SCHLEMM'schen Kanals fest zusammen, wo der sehnige und elastische Theil sich verbinden. Doch entspringt auch von dem vorderen Theile der Kanalwand ein lockeres Netzwerk von Fasern, die die Charaktere der elastischen an sich tragen, welche sich an den Anfang der Iris anheften. Die Fasermassen, welche dem Spannmuskel und der Iris angehören, sieht man zum Theil von der Wand des Kanals entspringen, zum Theil mögen sie aber auch direct von der Aderhaut auf die Iris übergehen. In dem Gewebe der Ciliarfortsätze sieht man eine grosse Zahl weiter Lumina durchschnittener Blutgefässe, auf ihrem dem Glaskörper zugekehrten Rande die Lage des schwarzen Pigments.

Um sich von der Richtigkeit der hier gegebenen Darstellung des Ansatzes der Iris zu überzeugen, muss man einerseits feine Schnitte von getrockneten Augenhäuten untersuchen, dabei aber beachten, dass das Trocknen sehr starke Verzerrungen hervorbringen kann, und dass die elastischen Fasern vor dem Ansatze der Iris sehr leicht reissen oder brechen, wenn man die Iris von der Hornhaut abzieht. Andererseits muss man frische Präparate untersuchen, wobei man am besten eine Borste in den SCHLEMM'schen Kanal einführt, ebenfalls aber sehr sorgfältig jedes Ziehen an der Iris oder Chorioidea vermeiden muss, denn dadurch kann man der Muskelmasse, durch welche diese Theile befestigt sind, jede beliebige Gestalt geben. Hebt man die Iris leise auf, und legt sie auf die Ciliarfortsätze zurück, so bemerkt man die feinen elastischen Fäden, welche sich zum vorderen Rande des Kanals hinüberspannen. Zieht man dann die Borste nach vorn, so erkennt man leicht die elastische Dehnbarkeit des vorderen Theils der Kanalwand. Schlägt man dagegen Iris und Chorioidea nach vorn über, und zieht die Borste nach hinten an, so zeigt sich der hintere Theil der Wand als unausdehnsam.

Die beschriebene Art des Ansatzes scheint mir für das Zurückweichen der Seitentheile der Iris beim Nahesehen wichtig zu sein. Ist die Iris nämlich erschlafft, so wird sie durch das Netzwerk der elastischen Fasern bei *b* bis zum vorderen Rande des SCHLEMM'schen Kanals an dessen innerer Wand festgehalten. Spannen sich dagegen die circulären und radialen Fasern der Iris gleichzeitig, so bietet erst die Sehnenmasse am hinteren Rande des Kanals ihrem Zuge einen genügend festen Widerstand, und man kann daher sagen, die erschlaffte Iris setzt sich an den vorderen, die gespannte an den hinteren Rand des SCHLEMM'schen Kanals, welche im Mittel 0,45 Mm. aus einander liegen. In *Taf. I. Fig. 3* habe ich das verschiedene Verhalten des Ansatzes der Iris beim Fernsehen (Seite *F*) und Nahesehen (Seite *N* der Figur) darzustellen gesucht. Der SCHLEMM'sche Kanal ist auf beiden Seiten mit *s* bezeichnet.

Ein anderer Theil des Auges, dessen Wirkungen bei der Accommodation noch in Betracht kommen könnten, sind die Ciliarfortsätze. L. FICK [1] hat nachgewiesen, dass sie unter dem Einflusse des elektrischen Stromes sich zusammenziehen, und ihr Blut entleeren, welches durch ziemlich weite Gefässverbindungen leicht in die *Vasa vorticosa* der Aderhaut abfliessen kann. Er nimmt an, dass durch diesen Uebergang des Blutes in dem Theile des Auges, welcher hinter der durch die Linse und Zonula gebildeten Scheidewand liegt, der hydrostatische Druck vermehrt, vorn vermindert werde. Dadurch werde die Mitte der Linse nach vorn gedrängt, ihre vordere Fläche wölbe sich deshalb mehr. Dagegen behauptet FICK folgerichtig, dass die hintere Fläche dabei flacher werde, was meinen Beobachtungen nicht entspricht. Auch J. CZERMAK [2] hat in einem Versuche, den Mechanismus der Accommodation zu erklären, neben der von CRAMER angenommenen Spannung der Iris und des Ciliarmuskels eine Anschwellung der Ciliarfortsätze zu Hülfe genommen, wodurch ein Druck auf den Rand der Linse ausgeübt werden könnte.

Gegen die Ansicht, dass die Augenmuskeln durch ihren Druck auf den Augapfel dessen Gestalt veränderten, ihn namentlich in Richtung der Augenaxe verlängerten, und dadurch die Netzhaut weiter von der Linse entfernten, eine Ansicht, die vor der Entdeckung der Formänderung der Linse viel gewichtige Freunde hatte, ist anzuführen, erstens, dass, wie ich durch

---

1 J. MÜLLER's Archiv. 1853. S. 449.
2 Prager Vierteljahrsschr. XLIII. S. 109.

Messungen mit dem Ophthalmometer gefunden habe, jede Steigerung des hydrostatischen Drucks im Auge die Hornhaut flacher macht, was man an lebenden Augen würde beobachten können, wenn es der Fall wäre, und zweitens, dass bei einem geringen Drucke mit dem Finger auf den Augapfel durch den Augenspiegel beobachtet werden kann, wie die Gefässe der Netzhaut enger werden, nur noch intermittirende Blutströme bei den Pulswellen hindurchlassen, endlich ganz collabiren. Sobald die intermittirende Bewegung (sichtbare Pulsation der Schlagadern) beginnt [1], verschwindet die Empfindlichkeit der Netzhaut, wahrscheinlich wegen ungenügender Blutzufuhr, und das Gesichtsfeld wird vollkommen schwarz.

Endlich sind noch die Versuche von Th. Young anzuführen, welche wohl kaum einen Zweifel darüber bestehen lassen können, dass auch nicht die geringste Verlängerung der Augenaxe beim Nahesehen eintritt. Man kann die Fläche der Bindehaut des Auges zwischen den Augenlidern mit einem glatten, gut polirten Stücke Metall ohne erhebliche Beschwerde berühren. Man setze in den inneren Augenwinkel auf die Bindehaut einen glatten eisernen Ring (eines Schlüssels) auf, den man fest gegen den inneren Rand der Augenhöhle anstemmt, und wende das Auge nach der inneren Seite herüber, so dass man durch den Ring und an dem Nasenrücken vorbei in die Ferne sieht. Dabei kommt der innere Umfang der Hornhaut ganz dicht an den Schlüssel zu liegen, und es wird somit verhindert, dass der Augapfel bei der Accommodation sich nach vorn verschieben könne. Nun dränge man den Ring eines ganz kleinen Schlüssels am äusseren Augenwinkel zwischen den Augapfel und den Knochen. Dabei wird durch den Druck auf den Augapfel die Netzhaut gereizt, und es erscheint im Gesichtsfelde scheinbar vor dem Nasenrücken ein dunkler, anfangs auch wohl heller Fleck, ein Druckbild. Dieses reichte bei Young bis auf die Stelle des deutlichsten Sehens, und er konnte erkennen, dass gerade Linien im Bereiche dieses Druckbildes eine leichte Krümmung erhielten, welche von einer durch den Druck veranlassten leichten Einbiegung der Sclerotica herzurühren schien. Da das Druckbild an der Stelle des deutlichsten Sehens entstand, musste der kleine Schlüssel die Gegend des gelben Flecks an der Hinterseite des Augapfels treffen. Unter diesen Umständen kann eine Verlängerung der Augenaxe offenbar nicht eintreten, ohne die Schlüssel von ihrer Stelle zu drängen. Wäre also die Accommodation mit einer Verlängerung der Augenaxe verbunden, so müsste sie unter diesen Umständen entweder ganz unmöglich sein, oder es müssten die Schlüssel verdrängt werden, und es müsste dabei das Druckbild wegen stärkerer Einbiegung der Hinterwand des Augapfels an Umfang ausserordentlich zunehmen. Nichts von allem diesem ist der Fall. Das Auge kann vollständig so gut wie sonst accommodirt werden, und das Druckbild bleibt bei veränderter Accommodation ganz dasselbe.

Th. Young scheint etwas hervorstehende Augen gehabt zu haben, wie auch aus anderen Versuchen, welche er beschreibt, hervorgeht. In meinem eigenen Auge reicht nur der eine Rand des Druckbildes bis zur Stelle des deutlichsten Sehens; übrigens konnte auch ich mich vollständig von der Möglichkeit der Accommodation und der Unveränderlichkeit des Druckbildes überzeugen.

Aus diesem Versuche folgt zunächst unmittelbar, dass die Entfernung des inneren Umfangs der Hornhaut von dem gelben Flecke oder einem Punkte der Hinterwand etwas nach aussen vom gelben Flecke vollständig unveränderlich sei. Es würde aber die Entfernung der Hornhaut von dem gelben Flecke ohne auffallende Asymmetrie des Auges sich nicht verändern können, wenn nicht die genannte Entfernung ihres Randes sich ebenfalls änderte.

Forbes meinte, dass bei der Accommodation für die Nähe das innere Auge unter einen stärkeren Druck gesetzt werde, und die Linse, weil sie wegen der verschiedenen Form und Dichtigkeit ihrer Schichten nach verschiedenen Richtungen hin verschieden elastisch sei, ihre Form ändere. De Haldat hat dagegen keine Veränderung der Brennweite des brechenden Apparates des Auges und einzelner Linsen finden können, welche er im Wasser comprimirte [2].

Ueber keinen andern Gegenstand der physiologischen Optik sind so viel widersprechende Ansichten aufgestellt worden, als über die Accommodation des Auges, weil erst in der aller-

---

[1] Donders in Nederl. Lancet. 1854. Novbr. S. 275.
[2] *Comptes rendus.* XX. p. 61, 458 u. 1561.

neuesten Zeit entscheidende Beobachtungsthatsachen gefunden wurden, und man bis dahin fast nur einem Spiel von Hypothesen überlassen gewesen war. Um die Uebersicht zu erleichtern, werde ich die chronologische Ordnung verlassen, welche überdies in der nachfolgenden Zusammenstellung der Literatur beibehalten werden wird, und werde die verschiedenen Ansichten vielmehr nach ihren wesentlichen Zügen zusammengruppiren.

1) Ansichten, welche die Nothwendigkeit und das Vorhandensein einer Aenderung des brechenden Apparates ganz läugnen. Mehrere Naturforscher glaubten, dass das thierische und menschliche Auge die Fähigkeit habe, abweichend von den künstlich gefertigten Linsen die Bilder verschieden entfernter Gegenstände an gleichem oder wenigstens unmerkbar verschiedenem Orte zu entwerfen. Magendie [1] behauptete, sich davon an den Augen von weissen Kaninchen überzeugt zu haben, bei denen das Pigment der Aderhaut fehlt, und daher das Bild durch den hinteren Theil der Sehnenhaut gesehen werden kann. In der That kann aber das Bild nicht scharf genug durch die Sehnenhaut gesehen werden, um die geringen Unterschiede, welche bei der Accommodation in Betracht kommen, zu bemerken. Dasselbe, wie Magendie, behaupteten Ritter [2], Haldat [3] und Adda [4]. Für die Krystallinse allein genommen, behaupteten Haldat und Engel [5] dasselbe. Wenn man die Krystallinse aus den Augenflüssigkeiten herausnimmt, und sie von Luft umgeben untersucht, wird ihre Brennweite ausserordentlich kurz, und dann folgt aus den allgemeinen optischen Gesetzen, dass die Abstände der Bilder für unendlich oder 7 Zoll entfernte Objecte nicht merklich unterschieden seien. Dadurch erklären sich die von Engel erhaltenen Resultate [6].

Durch genauer angestellte Versuche haben sich dagegen Hueck [7], Volkmann [8], Gerling [9], Mayer [9] und Cramer [10] experimentell überzeugt, worüber die Theorie schon keinen Zweifel lassen konnte, dass auch thierische und menschliche Augen Bilder verschieden entfernter Gegenstände in verschiedenen Entfernungen entwerfen.

Treviranus [11] glaubte auch eine theoretische Erklärung für die vermeintliche Thatsache geben zu können, dass die Lage der Bilder unabhängig von der Lage des Gegenstandes sei, indem er ein besonderes Gesetz für die Zunahme der Dichtigkeit in der Linse zu diesem Ende annahm. Seine mathematische Beweisführung ist durch Kohlrausch [12] widerlegt worden.

Sturm [13] glaubte die Abweichungen, welche die brechenden Flächen des Auges verglichen mit genauen Rotationsflächen zeigen, benutzen zu können, um die Accommodation für verschiedene Abstände zu erklären. Er untersucht zunächst den Gang homocentrischer Strahlen, wenn sie durch eine krumme Fläche gebrochen sind, welche nicht eine Rotationsfläche ist, und findet, dass sie dann nicht in einen Brennpunkt vereinigt werden, sondern dass zwei Brennebenen für die gebrochenen Strahlen existiren. In der einen dieser Brennebenen findet die Vereinigung der Strahlen nach einer Richtung statt, in der anderen nach der darauf senkrechten. Wenn der Querschnitt des Strahlenbündels in der einen Brennebene eine kurze horizontale gerade Linie bildet, so geht er durch eine Ellipse mit horizontaler grösster Axe in einen Kreis über, wenn man sich der anderen Brennebene nähert, und dann durch eine Ellipse mit senkrechter grosser Axe in eine senkrechte gerade Linie, wenn man bis zur anderen Brennebene fortschreitet. Zwischen den beiden Brennebenen hält Sturm den Querschnitt des Strahlenbündels im Auge für klein genug, um deutliche Bilder zu geben. Wird der leuchtende Punkt dem Auge genähert, so werden beide Brennebenen sich von der Linse entfernen, so lange aber die Netzhaut sich zwischen beiden Brennebenen befindet, würden die Bilder doch hinreichend deutlich bleiben.

Abweichungen der Art, wie sie Sturm annimmt, scheinen in der That bei den meisten menschlichen Augen vorzukommen, und wir werden die davon abhängigen Erscheinungen in §. 14 beschreiben, ebenda uns aber auch überzeugen, dass das Intervall der beiden Brennebenen lange

---

[1] *Précis élémentaire de Physiologie.* I. p. 73.
[2] Graefe und Walther's Journal. 1832. Bd. VIII. S. 347.
[3] *Comptes rendus.* 1842.
[4] *Ann. d. Ch. et d. Phys.* Sér. 3. Tom. XII. p. 94.
[5] J. Engel Prager Vierteljahrsschr. 1850. Bd. I. S. 167.
[6] S. ihre Widerlegung durch Mayer ebenda. 1850. Bd. IV. Ausserord. Beilage.
[7] Diss. de mutationibus oculi internis. Dorpati 1826. p. 17. — Die Bewegung der Krystallinse. Leipzig 1841.
[8] Neue Beiträge zur Physiol. d. Gesichtssinnes. 1836. S. 109.
[9] Poggendorff's Ann. XLVI. 243.
[10] Het Accommodatievermogen. Haarlem 1853. S. 9.
[11] Beiträge zur Anat. u. Physiol. der Sinneswerkzeuge. 1828. Heft I.
[12] Ueber Treviranus' Ansichten vom deutlichen Sehen in der Nähe und Ferne. Rinteln 1836.
[13] *Comptes rendus.* XX. 554, 761 u. 1238. S. die Widerlegungen von Crahay *Bull. de Bruxelles.* XII. 2. 311. Brücke Berl. Berichte. I. 207.

nicht so bedeutend ist, wie Sturm voraussetzt, und dass die erwähnte Abweichung des Auges keineswegs die Deutlichkeit des Sehens vermehrt, im Gegentheil vermindert.

De la Hire [1] behauptete, dass es nur einen Abstand des deutlichen Sehens gebe, und dass in einer gewissen Entfernung vor ihm und hinter ihm die Gegenstände noch nicht so undeutlich erschienen, um nicht erkannt zu werden; sonst gebe es keine Accommodation. Haller [2] ist im Wesentlichen derselben Meinung, und meint nur, dass auch die Verengerung der Pupille ein Hülfsmittel sei, um die Zerstreuungskreise naher Gegenstände kleiner zu machen; ebenso in neuester Zeit Besio [3].

Alle diese Ansichten, welche die Nothwendigkeit und das Vorhandensein einer inneren Veränderung des Auges ganz läugnen, werden am einfachsten widerlegt durch die Thatsache, dass wir einen in unveränderlicher Entfernung vor dem Auge liegenden Punkt willkürlich bald deutlich, bald undeutlich sehen können. Sie werden ferner widerlegt durch den Scheiner'schen Versuch, da wir einen solchen Punkt durch ein Kartenblatt mit zwei Oeffnungen willkürlich bald einfach, bald doppelt sehen können, und endlich durch die schon in §. 11 erwähnten Beobachtungen mit dem Augenspiegel, wobei die Veränderungen des optischen Bildes auf der Netzhaut auch objectiv sichtbar gemacht werden.

2) Ansichten, wonach die Verengerung der Pupille zur Accommodation für die Nähe genügen sollte. Die Thatsache, dass sich die Pupille beim Nahesehen verengt, war von Scheiner [4] gefunden worden. Wäre das Auge für die Ferne accommodirt, so würden die Zerstreuungskreise, in welchen nahe leuchtende Punkte auf der Netzhaut sich abbilden, durch Verengerung der Pupille allerdings verkleinert werden können. Indessen überzeugt man sich durch einen einfachen Versuch leicht davon, dass die Verengerung der Pupille nicht genügend ist, um das Auge für die Nähe zu accommodiren. Man braucht nur durch ein Kartenblatt mit einer Oeffnung zu sehen, die enger als die Pupille ist, und welches gleichsam eine künstliche unbewegliche Pupille vertritt, um sich zu überzeugen, dass man auch dann beim Fernsehen nahe Gegenstände undeutlich sieht, beim Nahesehen ferne. Anhänger einer solchen Ansicht waren ausser Haller, den ich schon genannt habe, le Roy [5], Hall [6], Morton [7]. Die Beweise gegen diese Meinung brachten vor Olbers [8], Dugès [9], Hueck und Donders [10]. Eine eigenthümliche Ansicht über den Erfolg der Verengerung der Pupille, die aber durch den schon genannten Versuch ebenfalls widerlegt wird, stellte J. Mile [11] auf, nahm sie aber selbst später wieder zurück [12]. Er glaubte, dass beim Fernsehen die Randstrahlen des Lichtbündels, welche von der Netzhaut die Augenaxe schneiden würden, durch Diffraction am Rande der Pupille vor der Augenaxe abgelenkt würden, und sie deshalb erst später schnitten. Die Diffraction des Lichts besteht aber keineswegs in einer solchen einfachen Ablenkung der ganzen Strahlen.

3) Ansichten, welche eine veränderte Krümmung der Hornhaut voraussetzen. Lobé [13] scheint der Erste gewesen zu sein, der eine Veränderung der Hornhautkrümmung wahrgenommen zu haben meinte. Olbers [14] wagt nach seinen eigenen Beobachtungen nicht bestimmt zu behaupten, dass die Convexität beim Nahesehen zunehme. Home [15], Englefield und Ramsden dagegen wollten eine Vermehrung der Krümmung bestimmt wahrgenommen haben. Jemand, der ein gutes Accommodationsvermögen besitzt, wurde mit dem Kopf in den Ausschnitt eines festen Brettes befestigt, so dass sein Kopf möglichst unbeweglich war. An dem Brette, in einem kleinen Abstande vom Auge, war eine Platte mit einer kleinen Oeffnung befestigt (als Fixationspunkt), während ebenfalls an dem Brette zur Seite des Auges ein bewegliches Mikroskop angebracht war, durch welches man die vorderste Krümmung der Hornhautfläche wahrnehmen konnte. Das Mikroskop selbst war mit einem Ocularmikrometer versehen. Beim Nahesehen sollte die Hornhaut stärker gekrümmt werden, so dass ihre Mitte um $^1/_{800}$

---

[1] *Journal des Sçavans.* 1685. p. 398.
[2] Elementa Physiologiae. 1743. Tom. V, p. 516.
[3] *Giornale Arcad.* CV. p. 3.
[4] Oculus. p. 31.
[5] *Mém. d. l'Acad. d. Sciences.* 1755. p. 594.
[6] Meckel's Archiv. Bd. IV. S. 611.
[7] *American Journal of med. Sciences.* 1831. Nov.
[8] De oculi mutationibus internis. Götting. 1780. p. 13.
[9] *Institut* 1834. No. 73.
[10] Ruete Leerboek der Ophthalmologie. 1846. bl. 110.
[11] Magendie *Journal de Physiologie.* VI. p. 166.
[12] Poggendorff's Ann. XLII.
[13] Albinus Dissert. de oculo humano. Lugd. Bat. 1742. p. 119.
[14] De oculi mutat. int. p. 39.
[15] *Philosoph. Transact.* 1795. p. 13. u. 1796. p. 2.

eines englischen Zolles vorrückte. Messung der Spiegelbildchen auf der Hornhaut, welche Home später ausführte, ergab zweifelhaftere Resultate. Wahrscheinlich ist er in beiden Fällen durch sehr kleine, regelmässig eintretende Verschiebungen des Kopfes der beobachteten Person von hinten nach vorn getäuscht worden. Th. Young [1] fand, indem er die Spiegelbilder der Hornhaut der Messung unterwarf, keine solche Unterschiede, und widerlegte namentlich die Hypothese der veränderten Hornhautkrümmung sehr schlagend in der oben beschriebenen Weise dadurch, dass er die unveränderte Existenz des Accommodationsvermögens nachwies, auch wenn das Auge unter Wasser gebracht ist. Hueck [2] fand bei der Wiederholung von Home's Versuchen ähnliche Resultate, meint aber ermittelt zu haben, dass die Athmungsbewegungen regelmässige Schwankungen des Kopfes hervorbringen, indem wir beim Nahesehen gewöhnlich einathmen, beim Fernsehen ausathmen. Sobald er den Athem anhalten liess, traten gar keine oder nur sehr unregelmässige Schwankungen der Mitte der Hornhaut ein. Diese unregelmässigen Schwankungen schienen durch Contractionen des Schliessmuskels der Augenlider hervorgebracht zu sein, da bei jeder Berührung der Cilien der Augapfel etwas zurückgedrängt wurde. Burow [3] fand bei einer sorgfältigen Wiederholung von Home's Versuchen keine regelmässigen Schwankungen der Hornhautfläche. Ebenso Valentin [4], Senff [5] stellte Messungen der Spiegelbildchen mit einem Fernrohr an, wodurch seine Messungen von kleinen Verschiebungen des Auges unabhängig wurden, und fand, dass der Krümmungshalbmesser der Hornhaut sich nicht um 0,01 Par. Linie veränderte, während das Auge bald auf 4, bald auf 222 Zoll accommodirt wurde. Auch Cramer [6] erhielt negative Resultate bei einer Messung der Spiegelbilder auf der Hornhaut mit Hülfe seines Ophthalmoskops. Sehr leicht und genau lässt sich diese Art von Messungen mittels des von mir construirten Ophthalmometers [7] ausführen, und gab mir ebenfalls stets negative Resultate.

Als Anhänger der Ansicht, wonach die Accommodation durch Aenderung der Hornhautkrümmung bewirkt werde, sind aus neuerer Zeit noch anzuführen Fries [8], Vallée [9] und Pappenheim [10]. Der Letztere nimmt an, dass die Contraction der Iris beim Nahesehen die Hornhaut convexer mache.

4) Ansichten, nach welchen die Accommodation durch Verschiebung der Linse bewirkt wird. Diese Annahme war die älteste, denn schon Kepler [11], aus dessen Theorie des Sehens sich zuerst auch die Nothwendigkeit der Accommodation ergab, stellte sie auf, und sie hat zu jeder Zeit viele Anhänger gehabt. Ihm folgten Scheiner [12], Plempius [13], Sturm [14], Conradi [15], Porterfield [16], Plattner [17], Jacobson [18], Brewster [19], J. Müller [20], Moser [21], Burow [22], Ruete [23], William Clay Wallace [24], C. Weber [25]. Die meisten dieser Männer hielten es für wahrscheinlich, dass der Ciliarkörper durch willkürlich hervorgebrachte Zusammenziehungen die Linse vor- und rückwärts bewegen könne. Um bei der Berechnung der Grösse, um welche die Linse verschoben werden müsste, um das Auge zu accommodiren, nicht unmögliche Grössen zu finden, war man gezwungen, der Hornhaut eine grössere, der Linse eine geringere Brennweite beizulegen, als diese Theile wirklich besitzen. Unterstützt

---

1 *Philosoph. Transact.* 1801. I. p. 55.
2 Die Bewegung der Krystallinse. S. 40.
3 Beiträge zur Physik und Physiologie des menschl. Auges. Berlin 1842. S. 115.
4 Lehrbuch der Physiologie. 1848. Bd. II. S. 122.
5 Wagner's Handwörterbuch der Physiologie. Art. Sehen. S. 303.
6 Het Accommodatievermogen. bl. 45.
7 Graefe's Archiv für Ophthalmologie, Bd. I. Abth. II. S. 24.
8 Ueber den optischen Mittelpunkt im menschl. Auge. Jena 1839. S. 27.
9 *C. R. d. l'Acad. d. Sciences.* 1847. Oct. p. 501.
10 Specielle Gewebelehre des Auges. Breslau 1842.
11 Dioptrice. Propos. 64.
12 Oculus. Oeniponti 1619. Lib. III. p. 163.
13 Ophthalmographia. Lovanii 1648. B. III.
14 Dissertatio visionem ex obscurae camerae tenebris illustrans. Altdorfii 1693. p. 172.
15 Froriep's Notizen. Bd. 45.
16 *On the eye.* Edinburgh 1759. Vol. I. p. 450.
17 De motu ligamenti ciliaris. Lipsiae 1738. p. 5.
18 Suppl. ad. Ophthalm. Copenh. 1821.
19 *Edinb. Journal of Science.* I. 77. — Poggendorff's Ann. II. 271.
20 Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1826. S. 212.
21 Repertor. d. Physik. Berlin 1844. Bd. V. S. 364.
22 Beiträge zur Physiol. u. Physik des menschl. Auges. Berlin 1842.
23 Lehrbuch der Ophthalmologie.
24 *The accommodation of the eye to distances.* New York 1850.
25 Disquisitiones quae ad facultatem oculum accommodandi spectant. Marburgi 1850. p. 31.

wurde diese Ansicht in neuerer Zeit auch namentlich durch Beobachtungen am lebenden Auge, welche bewiesen, dass die Pupille sich beim Nahesehen der Hornhaut nähert. Bei Vögeln hat BIDLOO [1] schon die stärkere Wölbung der Iris beim Nahesehen bemerkt, was für den Menschen später HUECK [2], BUROW [3] und RUETE bestätigten. C. WEBER zeigte auf mechanischem Wege, dass bei Hunden die Vorderfläche der Linse sich nach vorn bewegt, sobald der vordere Theil des Auges durch elektrische Ströme gereizt wird. Er machte zu dem Ende an dem Auge eines lebenden, durch Opium betäubten Hundes in der Mitte der Cornea eine runde Oeffnung, führte ein passend befestigtes Stäbchen ein, bis es die vordere Fläche der Linse berührte. Das andere Ende des Stäbchens stützte sich gegen den kürzeren Arm eines Fühlhebels, der das Vordrängen der vorderen Linsenfläche in vergrössertem Maassstabe anzeigte.

HANNOVER [4] nahm dagegen die Möglichkeit an, dass die Linse in ihrer Kapsel sich nach vorn und hinten bewegen könnte, wozu ihr der sogenannte *Liquor* MORGAGNII Platz lassen sollte. Dass eine solche Flüssigkeit in der normalen Linsenkapsel nicht existirt, ist schon erwähnt worden.

5) Ansichten, welche eine Formveränderung der Linse annehmen. Diese Annahme, welche sich endlich als die richtige erwiesen hat, wurde ebenfalls schon sehr früh gemacht und von Vielen vertheidigt, ohne dass sie aber das Stattfinden einer solchen Veränderung durch wirkliche Beobachtungen hätten erweisen können. Der erste war DESCARTES [5], es folgten PEMBERTON [6], CAMPER [7], HUNTER [8], TH. YOUNG [9], PURKINJE [10], GRAEFE [11], TH. SMITH [12], HUECK [13], STELLWAG VON CARION [14], FORBES [15]. Aeltere Anatomen, wie LEEUWENHOEK, PEMBERTON, nannten die Linse deshalb auch wohl *Musculus crystallinus*, weil sie voraussetzten, dass ihre Fasern contractil seien. TH. YOUNG stützte diese Ansicht auf Versuche, welche nicht jedem Auge gelingen, für ihn selbst aber vollständig beweisend waren. Wenn man durch ein feines Gitter von geraden Drähten das Zerstreuungsbild eines Lichtpunktes betrachtet, ist das Bild von geraden dunklen Linien, Schattenbildern der Drähte durchzogen. Diese waren vollständig gerade, wenn YOUNG's Auge für die Ferne accommodirt war, an den Seiten des Zerstreuungskreises dagegen nach aussen convex, wenn er in die Nähe sah. Die Erscheinung blieb dieselbe, wenn er das Auge unter Wasser brachte, und so den Einfluss der Hornhaut eliminirte. Die Krümmung der vorher geraden Schattenlinien konnte nur durch eine veränderte Krümmung der Linsenflächen bedingt sein. Zur Ausführung des Versuchs gehört eine weite Pupille. WOLLASTON konnte die Erscheinung nicht sehen (auch Referent nicht), wohl aber ein anderer Freund YOUNG's, KOENIG. Dem entsprechend fand YOUNG mittels seines Optometers, dass beim Sehen durch vier neben einander liegende Spalten die vier Bilder des Fadens sich in einem Punkte schnitten, wenn er für die Ferne, aber nicht, wenn er für die Nähe accommodirte.

Die Veränderung der Linsenreflexe bei Accommodationsänderungen beobachtete zuerst MAX LANGENBECK [16], und schloss auch richtig daraus, dass die vordere Linsenfläche beim Nahesehen gewölbter wird. Seine Beobachtungsweise ist aber ungünstig, indem er den Beobachteten direct in die Flamme blicken liess, wobei die drei Spiegelbilder dem Beobachter sehr nahe an einander zu stehen scheinen, und das überwiegend helle Hornhautbild die Wahrnehmung der beiden anderen erschwert. Dies mag der Grund sein, weshalb LANGENBECK's Beobachtung die Aufmerksamkeit der Physiologen nicht erregte. CRAMER beobachtete dasselbe, verbesserte aber die Methode der Beobachtung namentlich dadurch, dass er die Lichtstrahlen von der Seite her in das Auge fallen und den Beobachter von der anderen Seite hineinblicken liess. Auch beschrieb er ein Instrument, welches er Ophthalmoskop nannte, um die Beobachtungen leichter und sicherer zu machen. Es ist dies im Wesentlichen ein Gestell, an welchem eine

---

[1] Observ. de oculis et visu variorum animalium. Lugd. Bat. 1715.
[2] Bewegung der Krystallinse. S. 60.
[3] Beiträge zur Physiol. u. s. w. S. 136.
[4] Bidrag til Oiets Anatomie. Kjöbenhavn 1850. p. 111.
[5] CARTESIUS Dioptrice. Lugd. Bat. 1637.
[6] Dissert. de facultate oculi, qua ad diversas distantias se accommodat. Lugd. Bat. 1719.
[7] Dissert. physiol. de quibusdam oculi partibus. Lugd. Bat. 1746. p. 23.
[8] *Philosoph. Transact.* 1794. p. 21.
[9] Ibid. 1801. P. I. p. 53.
[10] Beobachtungen u. Versuche zur Physiol. d. Sinne. Berlin 1825.
[11] REIL's Archiv für Physiologie. Bd. IX. S. 231.
[12] *Philosophical Magazine.* 1833. T. V. 3. No. 13. — SCHMIDT's Jahrbücher. 1834. Bd. I. S. 6.
[13] Bewegung der Krystallinse. Leipzig 1841.
[14] Zeitschrift der k. k. Gesellschaft der Aerzte zu Wien. 1850. Heft 3 u. 4.
[15] *Comptes rendus.* XX. p. 61.
[16] Klinische Beiträge. Göttingen 1849.

Lampe, ein Fadenkreuz als Gesichtszeichen, ein Mikroskop von ungefähr 10 bis 20 maliger Vergrösserung und ein hohles kegelförmiges Stück mit den nöthigen Ausschnitten, an welches der Beobachtete sein Auge fest anlegt, angebracht sind. Der Beobachter stellt die Flamme so, dass er durch das Mikroskop in der Pupille des beobachteten Auges den Reflex der mittleren Linsenfläche zwischen den beiden anderen Reflexen erscheinen sieht. Indessen ist die wesentlichste Thatsache, die Verkleinerung des von der vorderen Linsenfläche entworfenen Bildes auf diese Weise nicht so bequem zu beobachten, als wenn man das Spiegelbild von zwei leuchtenden Punkten mit blossen Augen beobachtet, wie ich es oben beschrieben habe. Die Verschiebung des Reflexes der vorderen Linsenfläche dagegen, welche durch Cramer's Ophthalmoskop leicht und sicher zu beobachten ist, ist wegen der von Cramer noch nicht gekannten Asymmetrie des Auges für sich allein nicht beweisend, wenn man sich nicht, was leicht auszuführen ist, durch eine Reihe von Versuchen überzeugt, dass von jeder Stelle der Pupille aus das genannte Bild sich stets der Mitte der Pupille nähert.

Ohne von den beiden genannten Forschern zu wissen, und zu einer Zeit, wo Cramer's Entdeckung erst durch kurze Notizen [1], die er selbst und Donders gegeben hatte, veröffentlicht war, ehe noch seine von der Holländischen Gesellschaft der Wissenschaften gekrönte Abhandlung erschienen war, fand ich selbst dieselbe Thatsache [2], und ermittelte weiter dasjenige, was ich oben über das Verhalten der hinteren Fläche der Linse bei der Accommodation angeführt habe. [3]

Gegen die Abhängigkeit des Accommodationsvermögens von Verschiebungen und Formänderungen der Linse wurden vielfach Fälle geltend gemacht, in denen das Auge sich noch sollte accommodiren können, nachdem die Linse durch die Staaroperation entfernt war. Indessen ist dabei zu bedenken, dass eine Regeneration der Linse möglich ist, und dass die Kranken auch bei unpassender Accommodation aus Zerstreuungsbildern mancherlei erkennen können. Dass Jemand, der mit der Staarbrille Druckschrift liest, mit derselben Brille auch ferne Menschen, Fensterkreuze und dergleichen erkennen kann, berechtigt noch nicht, ihm Accommodationsvermögen zuzuschreiben. Ein Jeder kann sich leicht überzeugen, dass, wenn er einen Finger in etwa 1 Fuss Entfernung fixirt, er doch dabei eine Menge Einzelnheiten an weit entfernten Gegenständen wahrnehmen kann. Zum Beweis des Vorhandenseins von Accommodation gehört, dass der Kranke mit derselben Brille einen Gegenstand in bestimmter Entfernung willkürlich deutlich und undeutlich sehen kann, je nachdem er sein Auge für dieselbe oder eine andere Entfernung einzurichten strebt. Szokalsky will einen solchen Fall wirklich beobachtet haben; aber das betreffende Auge konnte ohne Staarbrille in 17 Zoll Entfernung deutlich sehen, was ohne Ersatz der Linse nicht möglich ist. Um bei operirten Augen während des Lebens zu erkennen, ob die Linse hergestellt sei, schlägt Donders vor, die entoptischen Erscheinungen zu benutzen.

6) Ansichten, welche eine Formveränderung des Augapfels annehmen. Wenn die Netzhaut sich von den brechenden Flächen entfernen, der Augapfel sich also verlängern könnte, würde das Auge sich dadurch für die Nähe accommodiren. Die Anhänger dieser Ansicht nahmen meistentheils an, dass die Augenmuskeln, entweder die rechten allein, oder die schiefen allein, oder alle zusammen, oder auch der Schliessmuskel der Augenlider, durch Druck auf den Augapfel dessen Gestalt verändern könnten. Hierzu gehören Sturm [4], le Moine [5], Buffon [6], Boerhave [7], Molinetti [8], Olbers [9], Haeseler [10], Walther [11], Morno [12], Himly [13], Meckel [14], Parrot [15], Poppe [16], Schroeder van der Kolk [17], Arnold [18], Serre [19],

---

1 Tydschrift der Maatschappy vor Geneeskunde. 1851. W. 11. bl. 115. und Nederlandsch Lancet. 2. Serie. W. 1. bl. 529. 1851—52.

2 Monatsberichte der Berliner Akad. 1853. Februar. S. 137.

3 Graefe's Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abth. II. S. 1—74.

4 Dissert. de presbyopia et myopia. Altdorfii 1697.

5 Quaestio an obliqui musculi retinam a crystallino removeant. Parisiis 1743.

6 *Histoire naturelle.* Paris 1749. T. III. p. 331.

7 Praelectiones academ. Taurini 1755. Vol. III. p. 121.

8 Haller Elementa Physiologiae. 1763. T. V. p. 511.

9 Dissert. de oculi mutat. int. Gottingae 1780. §. 43.

10 Betrachtungen über das menschliche Auge.

11 Dissert. de lente crystallina. §. 1.

12 Altenburger Annalen f. d. J. 1801. S. 97.

13 Ophthalmologische Beobachtungen und Untersuchungen. Bremen 1801.

14 Cuvier Vorlesungen über vergl. Anat. Uebers, von Meckel. Leipzig 1809. Bd. II. S. 369.

15 *Entretiens sur la physique.* Dorpat 1820. T. III. p. 434.

16 Die ganze Lehre vom Sehen. Tübingen 1823. S. 153.

17 Luchtmans Diss. de mutatione axis oculi. Traject. ad Rhenum 1832.

18 Untersuchungen über das Auge des Menschen, Heidelberg 1832. S. 38.

19 *Bulletin de thérapie.* 1835. T. 8. L. 4.

Bonnet [1], Henle [2], Szokalsky [3], Listing [4]. Dass die Augenmuskeln nicht nur die Form des Augapfels ändern können, sondern auch mittelbar die Hornhaut gewölbter machen und die Linse nach vorn verschieben, nimmt Clavel [5] an. Die Gründe, aus denen eine solche Gestaltänderung des Augapfels unwahrscheinlich erscheint, habe ich schon oben angeführt.

Die angeführten Ansichten sind die wichtigeren, welche über diesen schwierigen Gegenstand aufgestellt worden sind; daneben wurden von Einzelnen noch mancherlei andere Erklärungsweisen hervorgesucht, welche sich mit Recht geringeren Beifalls zu erfreuen hatten. Ich erwähne v. Grimm [6], welcher annahm, das Brechungsvermögen der Augenmedien könnte sich ändern; Weller [7], welcher die Accommodation nicht durch eine Veränderung des Auges, sondern durch einen psychischen Process erklären wollte u. s. w.

Literatur.

1611. Kepler Dioptrice. Propos. 26.
1619. Scheiner Oculus. Oeniponti 1619. Lib. III. p. 163.
1637. Cartesius Dioptrice. Lugd. Batav.
1648. V. F. Plempius Ophthalmographia. Lovanii. B. III.
1685. De la Hire *Journal des Sçavans.* 1685. p. 398.
1693. Sturm Dissertatio visionem ex obscurae camerae tenebris illustrans. Altdorfii. p. 172.
1697. Sturm Dissert. de presbyopia et myopia. Altdorfii.
1712. A. F. Walther Diss. de lente crystallina oculi humani. Lipsiae. Auch in Haller Disput. anat. Vol. IV.
1715. Bidloo Observationes de oculis et visu variorum animalium. Lugd. Batav.
1719. Pemberton Dissert. de facultate oculi, qua ad diversas distantias se accommodat. Lugd. Batav.
1738. J. J. Platner de motu ligamenti ciliaris in oculo. Lipsiae. p. 5.
1742. J. P. Lobé (Alpinus) Diss. de oculo humano. Lugd. Batav. p. 119. Auch in Haller Disput. anat. Vol. VII.
1743. Haller Elementa Physiologiae. T. V. p. 516.
Le Moine Quaestio an obliqui musculi retinam a crystallino removeant. Paris.
1746. P. Camper Dissert. physiologica de quibusdam oculi partibus. Lugd. Batav. p. 23. Auch in Haller Disput. anat. Vol. IV.
1749. Buffon *Histoire naturelle.* Paris. T. III. p. 331.
1755. Le Roy *Mémoires de l'Acad. de Paris.* 1755. p. 594.
Boerhave Praelectiones academicae, edit. et not. add. Alb. a Haller. Taurini. vol. III. p. 121.
1758. v. Grimm Diss. de visu. Gottingae.
1759. Porterfield *on the eye.* Edinburgh. Vol. I. p. 450. — *Edinb. med. Essays.* Vol. IV. p. 124.
1763. Molinetti in Haller Elementa physiologiae V. p. 511.
1783. Olbers Diss. de oculi mutationibus internis. Gottingae.
1793. Th. Young *Observations on vision. Phil. Trans.* 1793. P. II. p. 169.
1794. Hunter *Phil. Trans.* 1794. p. 21.
1795. Home *Phil. Trans.* 1795. P. I. p. 1. (Accommodation nach Staaroperation.)
1796. Home *Phil. Trans.* 1796. P. I. p. 1.
Th. Young de corporis humani viribus conservatricibus. Gottingae. — *Phil. Transact. for* 1800, p. 146.
1797. Klügel in Reil's Archiv. Bd. II. S. 51. (Gegen Home.)
1801. Morno Altenburger Annalen f. d. J. 1801. S. 97.
Himly Ophthalmologische Beobachtungen und Untersuchungen. Bremen.
*Th. Young *On the mechanisme of the eye. Phil. Trans.* 1801. P. I. p. 23*. (Eine Arbeit von bewunderungswürdigem Scharfsinn und Erfindungskraft, welche vollständig geeignet war, schon zu ihrer Zeit den Streit über die Accommodation zu entscheiden, aber durch ihre Kürze oft schwer verständlich wird, und ausserdem die vollständigste Kenntniss der mathematischen Optik voraussetzt.)

---

[1] Froriep's N. Notizen. 1841. S. 233.
[2] Canstatt's Jahresbericht für 1849. Bd. I. S. 71.
[3] Archiv für physiologische Heilkunde. VII. 1849. 7.—8. Heft.
[4] Wagner's Handwörterbuch d. Physiologie. IV. 498.
[5] *Comptes rendus.* XXXIII. p. 259.
[6] Dissert. de visu. Gottingae 1758. S. auch Olbers de oculi mutationibus internis. p. 29.
[7] Diätetik für gesunde und schwache Augen. Berlin 1821. S. 225.

1802. Home *Phil. Trans.* 1802. P. I. p. 1. (Adaptation bei Staaroperirten.)
Albers Beiträge zur Anatomie und Physiologie der Thiere. Heft I. Bremen.
1804. Graefe in Reil's Archiv für Physiologie. Bd. IX. S. 231.
1809. Cuvier Vorlesungen über die vergleichende Anatomie, übers. von Meckel. Leipzig. Bd. II. S. 369.
1811. Wells *Phil. Trans.* 1811. P. II. Auch in Gilbert's Annalen XLIII. 129 u. 141.
1816. Magendie *Précis élémentaire de Physiologie* I. p. 73. Paris. Uebers. von Elsässer. Tübingen 1834. I. 54.
1820. G. Parrot *Entretiens sur la physique.* Dorpat. T. III. p. 434.
1821. Jacobson Suppl. ad. Ophthalm. Copenhagen.
C. H. Weller Diätetik für gesunde und schwache Augen. Berlin. S. 225.
1823. J. Poppe Die ganze Lehre vom Sehen. Tübingen. S. 153.
Rudolphi Grundriss der Physiologie. Berlin. Bd. II. Abth. 1. S. 9.
Lehot *Nouvelle théorie de la vision.* Paris.
Purkinje De examine physiologico organi visus et systematis cutanei. Vratislaviae. (Entdeckung der Linsenreflexe.)
1824. Brewster *Edinb. Journal of Science* I. p. 77. — Poggendorff Annalen II. S. 271.
Simonoff in Magendie *Journal de Physiologie.* T. IV.
1825. Purkinje Beobachtungen und Versuche zur Physiol. der Sinne. Berlin. S. 128*.
1826. J. Müller zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig. S. 212.
Hueck Diss. de mutationibus oculi internis. Dorpati.
Mile in Magendie *Journal de Physiologie* VI. p. 166.
1828. Treviranus Beiträge zur Anatomie und Physiologie der Sinneswerkzeuge des Menschen und der Thiere. Heft I.
1831. Morton in *American. Journal. of med. Sciences.* 1831. Nov.
1832. Ritter in Graefe u. Walther's Journal. VIII. S. 347.
Fr. Arnold Untersuchungen über das Auge des Menschen. Heidelberg. S. 38.
G. J. Luchtmans Diss. de mutatione axis oculi secundum diversam distantiam objecti ejusque causa. Traject. ad Rhenum.
1833. Th. Smith *Philos. Magazine* V. 3. No. 13. — Schmidt's Jahrbücher der Medicin. 1834. Bd. I. S. 6.
1834. Dugés *Institut.* No. 73.
1835. Serre *Bulletin de Thérapie.* T. VIII. L. 4.
1836. Volkmann Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. S. 109.
R. K. Kohlrausch über Treviranus' Ansichten vom deutlichen Sehen in der Nähe und Ferne. Rinteln.
1837. Sanson *Leçons sur les maladies des yeux, publiées par* Bardinot *et* Pigne. Paris. (Ueber die Reflexe der Krystallinse.)
Mile in Poggendorff's Annalen XLII. S. 37 u. 235.
1838. Pasquet in Froriep's Notizen. Bd. VI. Nr. 2.
1839. J. F. Fries über den optischen Mittelpunkt im menschlichen Auge, nebst allgemeinen Bemerkungen über die Theorie des Sehens. Jena. S. 27.
1840. Neuber in Osann's Zeitschrift. Heft 7—12. S. 42.
1841. Hueck die Bewegung der Krystallinse.
Bonnet in Froriep's Neue Notizen. 1841. S. 233.
1842. Haldat in *Comptes rendus.* 1842.
Adda in *Annales de Chimie et de Phys.* Ser. III. T. XII. p. 94.
Burow Beiträge zur Physiol. u. Physik des menschl. Auges. S. 94—177*.
S. Pappenheim Die specielle Gewebelehre des Auges. Breslau.
1844. Moser Repert. d. Physik V. S. 364.
1845. Sturm *sur la théorie de la vision. Comptes rendus.* XX. p. 554, 761, 1238; Poggendorff Annalen LXV. 116.
Forbes *Comptes rendus.* XX. p. 61; *Institut.* No. 576. p. 15; No. 578. p. 32.
De Haldat *Comptes rendus.* XX. p. 458 u. 1561; *Institut.* No. 596. p. 90 (gegen Forbes).
1846. Donders in Ruete Leerboek der Ophthalmologie. bl. 110.
H. Meyer in Henle u. Pfeuffer Zeitschrift für rationelle Medicin. Bd. V. (Ursprung der Linsenreflexe.)
Senff in R. Wagner's Handwörterbuch der Physiologie, Art.: Sehen von Volkmann. S. 303.
Besio *Giorn. Arcad.* CV. 3; *Institut.* No. 666. p. 338.
J. G. Crahay *Bulletin de Bruxelles.* XII. 2. 311, *Institut.* No. 644. p. 151.

1847. L. L. Vallée *Comptes rendus.* XXV. p. 501.
1848. Valentin Lehrbuch der Physiologie. Bd. II. Abth. 2. S. 122.
Szokalsky in Griesinger Archiv für physiol. Heilkunde. VII. S. 694.
1849. Max. Langenbeck Klinische Beiträge aus dem Gebiete der Chirurgie und Ophthalmologie. Göttingen.
Donders in Nederlandsch Lancet. 1849. bl. 146.
1850. Jos. Engel Prager Vierteljahrsschrift XXV. S. 167 u. 208.
H. Mayer ebenda Bd. XXVIII. Ausserord. Beilage, und Bd. XXXII. S. 92*.
Henle in Canstatt's Jahresbericht für 1849. Erlangen. S. 71.
William Clay Wallace *The accommodation of the eye to distances.* New York.
C. Weber Nonnullae disquisitiones quae ad facultatem oculum rebus longinquis et propinquis accommodandi spectant. Marburgi.
C. Stellwag von Carion Wiener Zeitschrift der Ges. d. Aerzte. VI. S. 125—138.
A. Hannover Bidrag til Oiets Anatomie, Physiologie og Pathologie. Kjöbenhavn. p. III.
1851. H. Helmholtz Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge. Berlin. S. 37*.
Listing in R. Wagner's Handwörterbuch der Physiologie. Art.: Dioptrik des Auges. Bd. IV. S. 498*.
Cramer Tydschrift der Maatschappy vor Geneeskunde. 1851. W. 11. bl. 115; Nederlandsch Lancet. Ser. 2. W. 1. bl. 529.
Clavel *Comptes rendus.* XXXIII. p. 259; *Archives des sciences phys. et natur.* XIX. p. 76.
1852. Donders Nederl. Lancet. 1852. Febr. bl. 529.
1853. H. Helmholtz Monatsberichte d. Acad. zu Berlin. Febr. S. 137.
*A. Cramer het Accommodatievermogen der Oogen physiologisch toegelicht. Haarlem. Uebersetzt von Doden. Leer 1855.
L. und A. Fick in J. Müller's Archiv für Anat. u. Physiol. 1853. p. 449*.
1854. Donders in Onderzoekigen gedaan in het Physiologisch Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. p. 61.
J. Czermak in Prager Vierteljahrsschrift XLIII. S. 109.
1855. *H. Helmholtz über die Accommodation des Auges in v. Graefe Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abth. II. S. 1.

§. 13. Von der Farbenzerstreuung im Auge.

Dass die Lichtstrahlen, welche von einem gesehenen leuchtenden Punkte ausgegangen sind, durch die brechenden Mittel des Auges wieder in einen Punkt vereinigt werden, ist nur annähernd richtig. Wir wenden uns jetzt zum Studium der Abweichungen von dem genannten Gesetze, und wollen zunächst die chromatische Abweichung betrachten, welche daher entsteht, dass die Lichtstrahlen von verschiedener Schwingungsdauer auch verschiedene Brechbarkeit in tropfbaren und festen durchsichtigen Mitteln haben. Da die Grösse der Brennweiten gekrümmter brechender Flächen von dem Brechungsverhältnisse abhängig ist, so liegen die Vereinigungspunkte von Strahlen verschiedener Farbe bei Systemen solcher Flächen im Allgemeinen an verschiedenen Orten, und nur durch besondere Combinationen verschiedenartiger brechender Mittel lässt es sich erreichen, dass die Brennpunkte verschiedenfarbiger Strahlen in optischen Apparaten zusammenfallen, so dass diese dadurch achromatisch werden.

Das Auge ist nicht achromatisch, obgleich beim gewöhnlichen Sehen die Farbenzerstreuung sich fast gar nicht merklich macht. Dass der brechende Apparat des Auges verschiedene Brennweiten für verschiedenfarbige einfache Strahlen habe, zeigte Fraunhofer folgendermassen. Er beobachtete ein prismatisches Spectrum durch ein achromatisches Fernrohr, in dessen Oculare ein sehr feines Fadenkreuz angebracht war, und bemerkte, dass er die Ocularlinse dem

Fadenkreuze näher schieben musste, um dies deutlich sehen zu können, wenn er den violetten Theil des Spectrum im Gesichtsfelde hatte, als wenn er den rothen betrachtete. Indem er mit einem Auge einen äusseren Gegenstand fixirte, mit dem anderen den Faden im Fernrohr betrachtete, stellte er die Ocularlinse so, dass ihm der Faden ebenso deutlich wie das äussere Object erschien, und mass, um wie viel die Linie verschoben werden musste, um den Faden in zwei verschiedenen Farben gleich deutlich zu sehen. Mit Berücksichtigung der schon vorher gemessenen chromatischen Abweichung der Ocularlinse selbst konnte er dann berechnen, welches die entsprechenden Sehweiten des Auges seien. Er fand bei diesen Versuchen, dass ein Auge, welches ein unendlich entferntes Object deutlich sieht, dessen Licht der Linie *C* des Sonnenspectrum, also der Grenze zwischen Roth und Orange entspricht, bei demselben Accommodationszustande ein Object, dessen Licht der Farbe der Linie *G* (Grenze von Indigblau und Violett) entspräche, auf 18 bis 24 Par. Zoll nähern müsste, um es deutlich zu sehen.

Ich habe an meinen eigenen Augen ähnliche Resultate erhalten. Ich liess verschiedenfarbiges, mittels eines Prisma isolirtes Licht durch eine punktförmige Oeffnung eines dunklen Schirms fallen, und suchte dann die grösste Entfernung auf, aus der ich die kleine Oeffnung noch punktförmig sehen konnte. Die grösste Sehweite meines Auges für rothes Licht beträgt gegen 8 Fuss, für violettes $1\frac{1}{2}$ Fuss und für das brechbarste überviolette Licht der Sonne, welches durch Abblendung des helleren Lichts des Spectrum sichtbar gemacht werden kann, nur einige Zolle.

Auffallend bemerkt man die Verschiedenheit der Sehweiten, wenn man ein regelmässig rechteckiges, auf einen weissen Schirm projicirtes prismatisches Spectrum aus einiger Entfernung betrachtet. Während man das rothe Ende noch ziemlich gut in seiner wirklichen Form erkennt, erscheint das violette als eine Zerstreuungsfigur (die für meine Augen schwalbenschwanzförmig ist).

Das im Vergleiche mit künstlichen optischen Instrumenten ziemlich geringe Zerstreuungsvermögen des menschlichen Auges erklärt sich daraus, dass die Dispersion des Wassers und der meisten wässrigen Lösungen überhaupt viel geringer ist als die des Glases. Da die Brechungsverhältnisse der optischen Medien des Auges meist nicht beträchtlich von dem des Wassers abweichen, so scheint es wahrscheinlich zu sein, dass wenigstens die wässrige Feuchtigkeit und der Glaskörper auch nahezu dasselbe Zerstreuungsvermögen wie das Wasser haben werden. Ich habe deshalb die Dispersion für Listing's reducirtes Auge mit einer brechenden Fläche berechnet unter der Annahme, dass Wasser darin als brechende Substanz gebraucht sei. Für die von Fraunhofer bei seinen Versuchen gebrauchten Strahlen sind die Brechungsverhältnisse des Wassers folgende:

für das rothe Licht der Linie *C* 1,331705
für das violette der Linie *G* 1,341285.

Der Radius der einen brechenden Fläche von Listing's reducirtem Auge ist 5,1248 Mm. Daraus ergeben sich die Brennweiten im Innern des Auges:

im Roth 20,574 Mm.
im Violett 20,140 Mm.

Ist das Auge im Roth für unendliche Ferne accommodirt, steht also die Netzhaut im Brennpunkte der rothen Strahlen, so liegt der Brennpunkt der violetten 0,434 Mm. vor ihr, woraus folgt, dass in violettem Lichte dieses Auge für eine Entfernung von 713 Mm. (26 Zoll) accommodirt sein würde. FRAUNHOFER fand für sein eignes Auge 18 bis 24 Zoll, woraus folgt, dass die Farbenzerstreuung in einem aus destillirtem Wasser gebildeten Auge selbst noch etwas geringer sein würde, als sie im menschlichen Auge sich findet. Nimmt man dagegen an, dass das reducirte Auge wie meines im Roth für 8 Fuss (2,6 Meter) accommodirt sei, so würde die Netzhaut noch 0,123 Mm. hinter dem Brennpunkte der rothen Strahlen liegen müssen, und im Violett das Auge für $20^3/_4$ Zoll (560 Mm.) accommodirt sein, während meines in der That für 18 Zoll accommodirt war. Auch MATTHIESSEN [1] berechnet aus seinen Versuchen den Abstand des rothen und violetten Brennpunktes im menschlichen Auge auf 0,58 bis 0,62 Mm., während er in einem Auge aus destillirtem Wasser nur gleich 0,434 Mm. ist. MATTHIESSEN hat seine Messungen in der Weise angestellt, dass er den kürzesten Abstand mass, in welchem eine Glastheilung von rothem oder violettem Lichte beleuchtet deutlich gesehen werden konnte. Alle diese nach verschiedenen Methoden ausgeführten Untersuchungen stimmen darin überein, dass das menschliche Auge in Bezug auf Farbenzersetzung mit einem Auge aus destillirtem Wasser sehr nahe übereinstimmt, wahrscheinlich aber eine etwas stärkere Dispersion hat. Wir dürfen daraus wohl vermuthen, dass die Krystallinse ein im Verhältniss zu ihrem Brechungsvermögen etwas stärkeres Zerstreuungsvermögen als reines Wasser hat.

Ich will hier noch die Beschreibung einiger Versuche anreihen, bei denen sich die Farbenzersetzung im Auge merklich macht. Im Allgemeinen sind die hierhergehörigen Erscheinungen viel auffallender, wenn man dabei nicht weisses Licht, sondern Licht braucht, welches aus nur zwei prismatischen Farben von möglichst verschiedener Brechbarkeit zusammengesetzt ist. Am leichtesten erhält man solches Licht, wenn man Sonnenlicht durch die gewöhnlichen violettgefärbten Gläser gehen lässt. Diese Gläser absorbiren die mittleren Strahlen des Spectrum ziemlich vollständig, und lassen nur die äussersten Farben Roth und Violett hindurch. Will man mit Lampenlicht experimentiren, welches wenig blaue und violette Strahlen enthält, so wendet man besser die gewöhnlichen blauen (durch Kobalt gefärbten) Gläser an, welche ebenfalls vom Orange, Gelb und Grün nur wenig, reichlich dagegen das äusserste Roth, das Indigblau und Violett hindurchlassen.

Man mache eine enge Oeffnung in einen dunklen Schirm, befestige hinter derselben ein gefärbtes Glas von der erwähnten Art, und stelle ein Licht dahinter, dessen Strahlen durch das Glas und die Oeffnung in das Auge des Beobachters fallen. Die Oeffnung im Schirme können wir unter diesen Umständen als einen leuchtenden Punkt, der rothe und violette Strahlen aussendet, betrachten. Dem Beobachter erscheint dieser Punkt in verschiedener Weise, je nach der Entfernung, für welche sein Auge accommodirt ist. Ist es für die rothen Strahlen accommodirt, so geben die violetten einen Zerstreuungskreis,

---

[1] *Comptes rendus.* T. XXIV. p. 875.

und es erscheint ein rother Punkt mit violettem Lichthofe. Oder das Auge ist für die violetten Strahlen accommodirt, dann geben die rothen einen Zerstreuungskreis, und es erscheint ein violetter Punkt mit rothem Hofe. Auch ist ein Refractionszustand des Auges möglich, wobei der Vereinigungspunkt der violetten Strahlen vor, der der rothen hinter der Netzhaut liegt, und beide gleich grosse Zerstreuungskreise geben. Nur in diesem Falle erscheint der Lichtpunkt einfarbig. Bei diesem Refractionszustande des Auges würden diejenigen einfachen Strahlen auf der Netzhaut vereinigt werden, deren Brechbarkeit die Mitte zwischen der der rothen und violetten hält, also die grünen.

Deshalb geben diese Gläser ein Mittel von ziemlich grosser Empfindlichkeit ab, um die Entfernungen zu bestimmen, innerhalb welcher das Auge sich für die mittleren Strahlen des Spectrum accommodiren kann. Das sind nämlich die Entfernungen, innerhalb welcher das Auge das gemischte roth-violette Licht einfarbig sehen kann. Die Farbendifferenz der Ränder wird sehr leicht bemerkt, auch von einem Ungeübten, viel leichter als die Ungenauigkeit eines weissen Bildes. Ist das Auge für Licht jeder Brechbarkeit auf grössere Entfernungen als die des leuchtenden Punktes accommodirt, so geben die rothen Strahlen einen grösseren Zerstreuungskreis als die violetten, es erscheint also eine violette Scheibe mit rothem Saum. Ist das Auge für beide Farben auf kleinere Entfernungen als die des leuchtenden Punktes eingestellt, so erscheint umgekehrt ein rother Zerstreuungskreis mit blauem Saume.

Aehnliche Erscheinungen wie die der roth-violetten Gläser treten überall ein, wo ein Gegenstand zweierlei Arten verschiedenfarbigen Lichts von sehr unterschiedener Brechbarkeit aussendet. Sehr auffallend zeigen sie sich zum Beispiel auch bei den Versuchen über Mischung von Spectralfarben, welche ich später bei der Lehre von der Farbenmischung beschreiben werde.

Bei weisser Beleuchtung tritt natürlich ebenfalls eine Zerlegung des zusammengesetzten einfachen Lichts ein, aber sie ist unter gewöhnlichen Umständen wenig merklich. Die Beobachtung lehrt in dieser Beziehung, dass weisse Flächen, welche weiter entfernt als der Accommodationspunkt des Auges liegen, mit einem schwachen blauen Rande umgeben erscheinen, weisse Flächen, welche näher als der Accommodationspunkt liegen, mit einem schwachen rothgelben Rande, weisse Flächen dagegen, für welche das Auge genau accommodirt ist, lassen keine farbigen Ränder sehen, so lange die Pupille vollständig frei ist, zeigen aber solche Ränder, sobald man dicht vor das Auge den Rand eines undurchsichtigen Blattes schiebt, und dadurch der einen Hälfte der Pupille das Licht abschneidet. Und zwar erscheint die Grenze zwischen einem weissen und schwarzen Felde gelb gesäumt, wenn man das Blatt von der Seite her vor die Pupille schiebt, wo das schwarze Feld liegt, blau gesäumt dagegen, wenn man es von der Seite des weissen Feldes her vorschiebt.

Die eben beschriebenen Farbenzerstreuungserscheinungen im menschlichen Auge erklären sich sehr leicht aus dem Umstande, dass der hintere Brennpunkt der violetten Strahlen vor dem der rothen liegt.

Es sei *Fig. 61 A* der leuchtende Punkt, b_1 b_2 die vordere Hauptebene des Auges, v der Vereinigungspunkt der violetten, r der der rothen Strahlen, $c\ c$ die

Ebene, in welcher sich die äussersten rothen Strahlen des gebrochenen Strahlenkegels $b_1\ b_2\ r$ und die äussersten violetten $b_1\ b_2\ v$ schneiden. Der Anblick der Figur ergiebt sogleich, dass, wenn die Netzhaut vor der Ebene $c\ c$ sich befindet, d. h. wenn das Auge für fernere Gegenstände als A accommodirt ist, sie am Rande des Strahlenkegels nur von rothem Lichte, in der Axe aber von gemischtem getroffen werde. Steht sie in der Ebene $c\ c$, ist das Auge also für das Licht mittlerer Brechbarkeit von A accommodirt, so wird sie überall von gleichmässig gemischtem Lichte getroffen. Endlich, wenn die Netzhaut sich hinter der Ebene $c\ c$ befindet, das Auge also für nähere Gegenstände als A accommodirt ist, so trifft sie am Rande des Strahlenbündels nur violettes, in der Mitte gemischtes Licht.

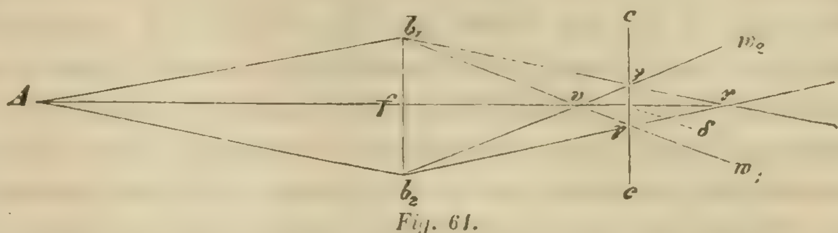


Fig. 61.

Ist das Auge für A accommodirt, befindet sich die Netzhaut also in der Ebene $c\ c$, und wird der untere Theil der Apertur $b_1\ b_2$, durch welche der Strahlenkegel einfällt, bis f hin verdeckt, so fallen die violetten Strahlen zwischen $b_2\ v$ und $f\ v$, sowie deren Verlängerungen zwischen $v\ w_2$ und $v\ r$ fort, und die rothen zwischen $b_2\ r$ und $f\ r$. Es verschwindet dann also in der Ebene $c\ c$ oberhalb der Axe das violette, unterhalb der Axe das rothe Licht, und es wird sich auf der Retina statt des Bildes des Punktes A ein kleiner oben rother, unten violetter Zerstreuungskreis bilden.

Befindet sich in A statt eines einzelnen leuchtenden Punktes eine gleichmässig rothes und violettes Licht aussendende Fläche, deren Bild auf der Retina entworfen wird, so wird gleichzeitig ein rothes und ein violettes Bild der Fläche entworfen werden, von denen mindestens eines ein Zerstreuungsbild sein muss. Zerstreuungsbilder von Flächen haben, wie in §. 11 auseinandergesetzt ist, in ihrer Mitte, wo die Zerstreuungskreise der Punkte des Randes nicht hinreichen, dieselbe Helligkeit wie ein scharfgesehenes Bild. Ihre Ränder sind dagegen verwaschen und fliessen so weit über das Bild der Umgebung über, als die Zerstreuungskreise der Randpunkte reichen. Wenn sich nun ein rothes und ein violettes Bild einer Fläche decken, so wird sich in der Mitte, so weit beide die normale Helligkeit haben, die Mischfarbe zeigen, an den Rändern aber diejenige Farbe allein erscheinen, deren Zerstreuungskreise die grössten sind, für welche also der Rand des Bildes am weitesten über die Umgebung greift.

Wird das Bild der Fläche in der Ebene $c\ c$ aufgefangen, wo die rothen und violetten Zerstreuungskreise gleich gross sind, so werden die Farben bis zum Rande gleichmässig gemischt sein. Zerstreuungsbilder verschieben sich aber scheinbar, wie wir aus §. 11 wissen, wenn man einen Schirm vor die Pupille schiebt, und zwar nach entgegengesetzten Richtungen, wenn sie, wie in unserem Falle das rothe und violette, das eine durch zu nahe, das andere durch zu weite Accommodation entstehen. Daher hört die Congruenz der farbigen Bilder auf, und es werden farbige Ränder sichtbar.

Für das rothe Licht verhält sich die Fläche wie ein Gegenstand, der dem Auge zu nahe ist; ein solcher bewegt sich dem die Pupille verdeckenden Schirme scheinbar entgegen. Für das violette Licht verhält es sich umgekehrt. Verdeckt man also z. B. von unten her die Pupille, so verschiebt sich die rothe Fläche scheinbar nach unten, die violette nach oben; unten wird ein rother, oben ein violetter Rand sichtbar. Betrachtet man eine schmale roth-violette Linie durch einen schmalen Spalt, den man vor der Pupille hin und her bewegt, so gelingt es auch leicht, das rothe von dem violetten Bilde ganz getrennt sichtbar zu machen.

Wenn von dem leuchtenden Punkte *A Fig. 61* nicht blos rothes und violettes Licht, sondern aus allen Farben zusammengesetztes weisses Licht ausgeht, so schaltet sich das der übrigen Farben zwischen dem Roth und Violett ein, und die Wirkungen der Farbenzerstreuung sind weniger auffallend, als wenn zwei Farben allein da sind. Wo wir in diesem Falle einen violetten Saum um ein purpurnes Feld hatten, erscheint jetzt das weisse Feld gesäumt mit weisslichem Blau, Indigblau, Violett, und da die weisslichen Töne des inneren Randes dieses Saumes sich nicht merklich vom Weiss der Mitte unterscheiden, erscheint der farbige Saum überhaupt schmäler. Wo bei dem Versuche mit den zwei Farben ein rother Saum um das purpurne Feld erschien, haben wir jetzt um das weisse Feld herum zuerst weissliches Gelb, Orange, Roth, und wieder unterscheidet sich das weissliche Gelb fast gar nicht von dem Weiss des Grundes.

Eine besondere Betrachtung verdient die Dispersion des weissen Lichts noch für den Fall, wo die Netzhaut sich in der Ebene *c c* befindet, wo das Strahlenbündel seinen kleinsten Durchmesser hat. Roth und Violett bilden hier gleich grosse Zerstreuungskreise. Das mittlere Grün ist ganz in der Axe concentrirt, die übrigen Farben bilden kleinere Zerstreuungskreise. Der Zerstreuungskreis auf der Retina würde also am Rande gemischt aus Roth und Violett, d. h. purpurroth, in der Mitte grünlich erscheinen müssen. Indessen ist davon im Auge nichts zu sehen. Es sind nämlich gerade die lichtstärksten Farben Gelb und Grün bei dieser Stellung der Retina fast genau in einen Punkt vereinigt, und der purpurne Rand ist zu schmal und verhältnissmässig zu lichtschwach, um wahrgenommen zu werden.

Uebrigens kann man alle die beschriebenen Erscheinungen ganz ebenso wie bei dem Auge, nur noch augenfälliger, an einem nicht achromatisirten Fernrohr wahrnehmen, wenn man eine stärkere Vergrösserung mit demselben erzeugt, als mit der Deutlichkeit des Bildes verträglich ist. In einem solchen Fernrohre wird das von der Objectivlinse entworfene Bild nicht auf einem Schirme aufgefangen, wie im Auge auf der Netzhaut, sondern durch die vergrössernden Ocularlinsen vom Beschauer betrachtet. Eine Vergrösserung des vom Objectivglase entworfenen Bildes muss man aber anwenden, weil sonst die Farbensäume meist zu schmal sind, um deutlich gesehen zu werden. Auch hier sieht man, wenn das Fernrohr für einen entfernteren Gesichtspunkt eingerichtet ist, weisse Flächen roth und gelb gesäumt, ist es für einen näheren eingestellt, dagegen blau gesäumt. Bei der Einstellung, welche die schärfsten Bilder giebt, erscheinen dagegen sehr schmale purpurne Ränder. Verdeckt man eine Hälfte des Objectivs, so erscheinen an gegenüberliegenden Rändern der weissen

Flächen blaue und gelbe Ränder u. s. w., ganz wie unter analogen Verhältnissen im Auge.

Um die Grösse der durch Dispersion im Auge erzeugten Zerstreuungskreise zu berechnen, können wir LISTING's reducirtes Auge und darin Wasser als brechende Flüssigkeit zum Grunde legen, da nach FRAUNHOFER's Messungen die farbenzerstreuende Kraft eines solchen Auges von der des menschlichen wenig abweichen würde. Es verhält sich (*Fig. 61*)

$$\frac{\gamma\gamma}{b_1 b_2} = \frac{\delta r}{fr} = \frac{\delta v}{fv}, \text{ also ist}$$

$$\gamma\gamma \cdot fr = b_1 b_2 \,.\, \delta r$$

$$\gamma\gamma \,.\, fv = b_1 b_2 \,.\, \delta v. \text{ Beides addirt giebt}$$

$$\gamma\gamma\,[fr + fv] = b_1 b_2 \,.\, [\delta r + \delta v]$$

$$= b_1 b_2\,[fr - fv]$$

$$\gamma\gamma = b_1 b_2 \frac{fr - fv}{fr + fv}.$$

Setzen wir $b_1 b_2$, entsprechend dem mittleren Durchmesser der Pupille normaler Augen, gleich 4 Mm., und setzen, wie oben gefunden ist,

$$fr = 20{,}574 \text{ Mm.}$$

$$fv = 20{,}140 \text{ Mm.}$$

$$\text{so wird } \gamma\gamma = 0{,}0426 \text{ Mm.}$$

Nach der in §. 11 gegebenen Tafel für die Grösse der Zerstreuungskreise von Objecten, für welche das Auge nicht accommodirt ist, würde daher der Durchmesser $\gamma\gamma$ der durch die Dispersion bedingten Zerstreuungskreise ebenso gross sein, wie der, den ein leuchtender Punkt in 1,5 Meter ($4^3/_4$ Fuss) Entfernung in einem für unendliche Entfernung accommodirten Auge giebt. Eine solche Abweichung der Accommodation giebt bei der Betrachtung feinerer Gegenstände schon eine recht merkliche Ungenauigkeit des Bildes, wie man bei Anstellung eines entsprechenden Versuches leicht erkennt. Um zu erklären, warum die Dispersion des weissen Lichts im Auge trotz der gleichen Grösse der Zerstreuungskreise keine merkliche Ungenauigkeit des Bildes hervorbringt, muss man nicht blos die Grösse der Zerstreuungskreise, sondern auch die Vertheilung des Lichts in denselben berücksichtigen.

Wenn ein Lichtkegel von einem einfarbig leuchtenden Punkte in das Auge fällt, und die Netzhaut sich vor oder hinter dem Vereinigungspunkte der Strahlen befindet, so wird ein Zerstreuungskreis gebildet, der in allen seinen Theilen gleiche Helligkeit hat.

Wenn dagegen das Auge von einem Kegel weissen Lichts getroffen wird, und sich im Vereinigungspunkte der grüngelben Strahlen, welche die lichtstärksten sind, befindet, so werden diese auf einen Punkt der Netzhaut vereinigt, während die übrigen Strahlen Zerstreuungskreise bilden, welche um so grösser werden, je mehr ihre Brechbarkeit von der der mittleren Strahlen abweicht.

Während also der Mittelpunkt des beleuchteten Kreises von Strahlen aller Art gleichzeitig getroffen wird, und namentlich auch von den lichtstärksten und am meisten concentrirten Strahlen, fallen auf die dem Rande näher liegenden Theile des Kreises nur Strahlen von den äussersten Farben des Spectrums, welche erstens an und für sich schon lichtschwächer sind als die mittleren, und zweitens dadurch, dass sie ihr Licht über grössere Zerstreuungskreise vertheilen, noch mehr geschwächt sind. Die Rechnung ergiebt, dass unter diesen Umständen die Helligkeit im Mittel-

punkte des Zerstreuungskreises unendlich gross sein muss gegen alle anderen Punkte des Kreises.

Da wir für das Gesetz der Helligkeit der einzelnen Farben des Spectrums noch keinen mathematischen Ausdruck angeben können, wollen wir die Rechnung unter der Annahme durchführen, dass alle Farben des Spectrums gleiche Helligkeit haben. Dabei werden wir allerdings die Helligkeit der Ränder der Zerstreuungskreise grösser finden, als sie in Wahrheit ist, aber es wird sich auch unter dieser für unseren Zweck ungünstigen Annahme zeigen, warum die durch Farbenzerstreuung bedingten Zerstreuungskreise eine weit geringere Undeutlichkeit des Bildes geben, als die durch mangelnde Accommodation bedingten von gleicher Grösse.

Berechnung der Helligkeit in einem durch Dispersion erzeugten Zerstreuungskreise eines einzelnen leuchtenden Punktes.

Es sei in *Fig.* 62 $b\,b$ die Hauptebene des reducirten Auges vom Radius R; in ihr möge, wie das beim Auge nahehin der Fall ist, die Blendung liegen, welche das Strahlenbündel begrenzt, so dass $b\,b$ ein Durchmesser der Blendung ist, deren Halbmesser wir in der Rechnung mit b bezeichnen wollen. Die Strahlen, welche in das Auge fallen, mögen parallel sein. Es sei ferner v der Brennpunkt für die äussersten violetten, w der für die äussersten rothen Strahlen. Diese äussersten Strahlen schneiden sich in g, so dass $g\,g$ der Durchmesser des ganzen Zerstreuungskreises und h sein Mittelpunkt ist. Die Netzhaut muss sich in der Ebene $g\,g$ befinden, wenn sie das deutlichste Bild aufnehmen soll. Das Brechungsverhältniss der mittleren Strahlen, die sich in h vereinigen, nennen wir N, ihre Brennweite $a\,h$ sei F. Dann ist nach §. 9 Gleichung 3 a)

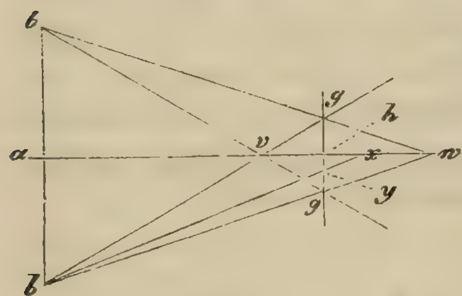


Fig. 62.

$$F = \frac{N R}{N - 1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1a).$$

Das Brechungsverhältniss irgend einer anderen Art von Strahlen, welche ihren Brennpunkt in x haben, sei n, die zugehörige Brennweite $a\,x$ gleich f. Dann ist

$$f = \frac{n R}{n - 1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1b).$$

Den Radius des Zerstreuungskreises, den diese Strahlen geben, $h\,y$ nennen wir ϱ. Er ist gegeben durch die Gleichung

$$\frac{\varrho}{b} = \frac{f - F}{f},$$

wenn $f > F$, also $n < N$, oder durch

$$\frac{\varrho}{b} = \frac{F - f}{f},$$

wenn $f < F$, also $n > N$. Setzen wir hierin die Werthe von F und f aus 1 a) und 1 b), so erhalten wir

$$\frac{\varrho}{b} = \frac{N - n}{n(N - 1)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2a),$$

wenn $n < N$, und

$$\frac{\varrho}{b} = \frac{n - N}{n(N - 1)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2b).$$

wenn $n > N$.

Die Helligkeit H nun, mit welcher die Farbe von dem Brechungsverhältniss n der Netzhaut beleuchtet, ist

$$H = A\frac{b^2}{\rho^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3),$$

wenn wir die Helligkeit mit A bezeichnen, mit welcher das betreffende Licht die Fläche $b\,b$ beleuchtet. Setzen wir in 3) statt $\frac{b}{\rho}$ seinen Werth aus 2a) oder 2b), so erhalten wir übereinstimmend:

$$H = A\frac{n^2\,(N-1)^2}{(n-N)^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3a).$$

Die Helligkeit J irgend eines Punktes im Zerstreuungskreise wird nun werden

$$J = \int H\,d\,n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4),$$

wobei wir das Integral über alle diejenigen Werthe von n auszudehnen haben, deren zugehörige Farben auf jenen Punkt fallen.

In dem Ausdrucke für H ist der Factor A in Wirklichkeit eine Funktion von n, deren mathematischen Ausdruck wir aber nicht kennen. Der Factor n^2 verändert in der ganzen Ausdehnung des Spectrums seinen Werth sehr wenig. Wir wollen deshalb setzen

$$A\,n^2\,(N-1)^2 = B$$

und B als constant ansehen, d. h. annehmen, dass die Helligkeit der Spectralfarben durch die ganze Ausdehnung des Spectrums nahehin constant sei, und nur wenig vom rothen zum violetten Ende hin abnehme. Diese Annahme ist für unseren Zweck jedenfalls ungünstiger als die Wirklichkeit. Dann wird nach 4)

$$J = \int\frac{B\,d\,n}{(N-n)^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4a).$$

zwischen den gehörigen Grenzen genommen. Es fallen aber auf jeden Punkt des Zerstreuungskreises erstens Strahlen von dem rothen und zweitens Strahlen von dem violetten Ende des Spectrums. Die Grenzen der Brechbarkeit für die ersteren seien n_1 und n_2, so dass

$$N > n_2 > n_1,$$

die Grenzen für die letzteren seien n_3 und n_4, so dass

$$n_4 > n_3 > N.$$

Dann wird die Gleichung 4a)

$$J = B\int_{n_1}^{n_2}\frac{d\,n}{(N-n)^2} + B\int_{n_3}^{n_4}\frac{d\,n}{(N-n)^2}$$

$$= B\left\{\frac{1}{N-n_2} - \frac{1}{N-n_1} + \frac{1}{N-n_4} - \frac{1}{N-n_3}\right\} \quad \ldots \quad 4b)$$

Ist nun ρ_0 die Entfernung des Punktes, dessen Helligkeit wir bestimmen wollen, vom Mittelpunkte des Zerstreuungskreises, so wird dieser Punkt von allen denjenigen Farben getroffen, für welche die Radien der Zerstreuungskreise grösser sind als ρ_0, also zwischen ρ_0 und r liegen. Nun ist für die weniger brechbaren Farben, wenn wir aus Gleichung 2a) den Werth von $N-n$ bestimmen,

$$\frac{1}{N-n} = \frac{1}{N} + \frac{1}{N(N-1)}\cdot\frac{b}{\rho}.$$

Für n_1 ist $\rho = r$, für n_2 ist $\rho = \rho_0$, also

$$\left.\begin{aligned} \frac{1}{N - n_1} &= \frac{1}{N} + \frac{1}{(N-1)N} \cdot \frac{b}{r} \\ \frac{1}{N - n_2} &= \frac{1}{N} + \frac{1}{(N-1)N} \cdot \frac{b}{\rho_0} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 4c).$$

Für die Bestimmung von n_3 und n_4 müssen wir den Werth von $N - n$ aus Gleichung 2 b) entnehmen.

$$\frac{1}{N-n} = \frac{1}{N} = \frac{1}{N(N-1)} \frac{b}{\rho}$$

Für $n = n_4$ wird $\rho = r$, und für $n = n_3$ wird $\rho = \rho_0$, also

$$\left.\begin{aligned} \frac{1}{N - n_4} &= \frac{1}{N} - \frac{1}{N(N-1)} \frac{b}{r} \\ \frac{1}{N - n_3} &= \frac{1}{N} - \frac{1}{N(N-1)} \cdot \frac{b}{\rho_0} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 4d).$$

Setzen wir die Werthe aus 4 c) und 4 d) in 4 b), so erhalten wir endlich

$$J = \frac{2B}{N(N-1)} \left\{ \frac{b}{\rho^0} \cdot \frac{b}{r} \right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5).$$

Dieser Werth von J wird in der Mitte des Zerstreuungskreises für $\rho_0 = 0$ unendlich gross, am Rande, wo $\rho_0 = r$, gleich 0.

Berechnung der Helligkeit am Rande einer gleichmässig erleuchteten Fläche. Es sei in *Fig. 65* AB die Grenzlinie der leuchtenden Fläche, und angenommen, dass jeder Punkt derselben als Zerstreuungskreis erscheine. Es sei ferner p der Punkt, dessen Helligkeit bestimmt werden soll, und $pq = r$ der Radius der Zerstreuungskreise. Es wird auf p Licht gelangen aus allen denjenigen Punkten der Fläche, welche innerhalb des mit dem Radius r um p geschlagenen Kreises liegen. Wenn s einer dieser Punkte ist; und wir die Länge sp mit ρ, den Winkel spq mit ω, und die Helligkeit des Zerstreuungskreises eines einzelnen Punktes in der Entfernung ρ vom Centrum mit J bezeichnen, so wird die Helligkeit H im Punkte p werden:

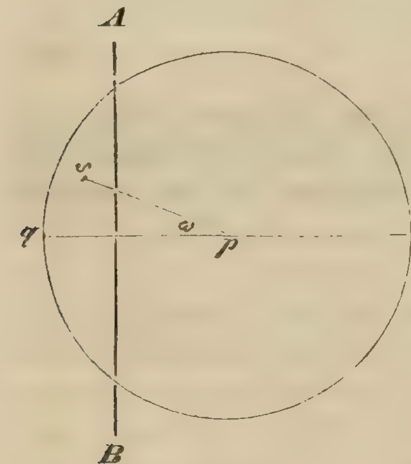


Fig. 63.

$$H = \iint J \rho \, d\omega \, d\rho \quad \ldots \quad 6),$$

dieses Integral ausgedehnt über alle Theile der Fläche, welche innerhalb des um p geschlagenen Kreises liegen.

Wenn der Rand der Fläche eine gerade Linie und der Abstand des Punktes s von diesem Rande gleich x ist, so ist für die am Rande gelegenen Punkte der Fläche

$$\rho \cos \omega = x,$$

und wenn wir den Ausdruck für H zuerst nach ω integriren, und aus der letzten Gleichung den Werth für die Grenzen von ω entnehmen,

$$H = \int_x^r 2J\rho \; arc.\cos\left(\frac{x}{\rho}\right) d\rho \quad \ldots\ldots \quad 6a).$$

Wenn die Zerstreuungskreise durch unpassende Accommodation entstehen, können wir J als unabhängig von ρ betrachten und erhalten dann:

$$H = J\left[r^2 \, arc. \, cos. \left(\frac{x}{r}\right) - x\sqrt{r^2 - x^2}\right] \quad . \quad . \quad . \quad 7),$$

welche Gleichung für diesen Fall die Helligkeit in der Nähe des Randes der Fläche als Function des Abstandes vom Rande giebt. Für $x = r$ wird $H = 0$, für $x = -r$ wird $H = J r^2 \pi$ und geht hier in die constante Helligkeit der Fläche über.

Wenn die Zerstreuungskreise durch Dispersion entstanden sind, können wir in Gleichung 6a) den Werth von J aus Gleichung 5) setzen, und erhalten durch Ausführung der Integration:

$$H = \frac{2\,B\,b}{N(N-1)}\left\{r \, arc. \, cos\left(\frac{x}{r}\right) + \frac{x}{r}\sqrt{r^2 - x^2} + x \, log. \, nat\left(\frac{r - \sqrt{r^2 - x^2}}{r + \sqrt{r^2 - x^2}}\right)\right\} \quad 8).$$

Für $x = r$ wird $H = 0$, für $x = -r$ wird

$$H = \frac{2\,B\,b\,r\,\pi}{N(N-1)}$$

und geht hier in die constante Helligkeit des mittleren Theils der Fläche über.

Um den Gang dieser Functionen übersichtlicher darzustellen, habe ich in *Fig. 64* die beiden Curven construirt. A entspricht der Gleichung 7), B der Gleichung 8).

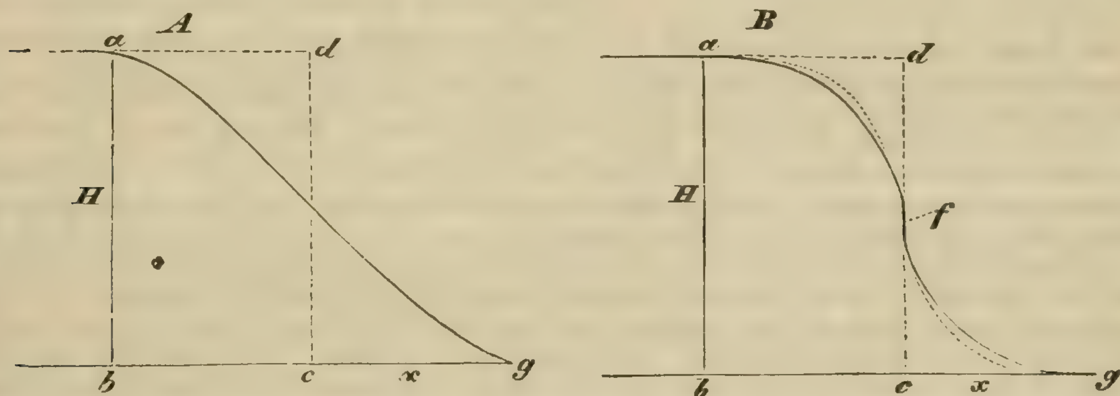


Fig. 64.

In beiden sind die Werthe von x in horizontaler, die Werthe der Helligkeit H in verticaler Richtung aufgetragen. Die Ordinate $a\,b$ entspricht der Helligkeit in der Mitte der Fläche, c bezeichnet den Ort des Randes, so dass die Linie $a\,d\,c$ die Helligkeit eines ganz scharfen Bildes bezeichnen würde. Die Grenzen des Zerstreuungskreises von c sind b und g. Die Curve B zeichnet sich dadurch vor der anderen aus, dass sie in ihrer Mitte bei f, entsprechend dem wirklichen Orte des Randes, ganz senkrecht abfällt. Es wird hier für $x = 0$ nämlich der Differentialquotient

$$\frac{d\,H}{d\,b} = \frac{2\,B\,b}{N(N-1)}\left\{\frac{2}{r}\sqrt{r_2 - x_2} + log. \, nat. \left[\frac{r - \sqrt{r^2 - x^2}}{r + \sqrt{r^2 - x^2}}\right]\right\} \quad . \quad 9)$$

unendlich gross. Dieser plötzliche Abfall der Helligkeit am Rande der Fläche macht für das Auge die Lage des Randes erkennbar, wenn auch eine gewisse Menge Licht sich noch weiter verbreitet, während in der Curve A die Abnahme der Helligkeit ziemlich gleichmässig stattfindet, und der Ort des Randes durch kein besonderes Kennzeichen ausgezeichnet ist.

Wenn man die nach den Enden des Spectrums abnehmende Helligkeit der Farben

in Rechnung ziehen könnte, so würde die Curve *B* etwa die Form der punktirten Linie bekommen müssen. Die Helligkeit innerhalb der Grenzen der Fläche würde sich der normalen noch mehr nähern, und ausserhalb dieser Grenzen würde sie noch geringer werden.

Aus diesen Verhältnissen erklärt es sich, warum die Farbenzerstreuung der Bilder im Auge der Schärfe des Sehens so wenig Eintrag thut. Ich habe mir Linsen zusammengestellt, welche im Stande waren, das Auge achromatisch zu machen, aber nicht gefunden, dass die Schärfe des Gesichts dadurch merklich erhöht wurde. Ich fand zu dem Ende eine concave Flintglaslinse von 15,4 Mm. Brennweite, von einem Objectivglase eines Mikroskops genommen, passend. Diese setzte ich zusammen mit convexen Crownglaslinsen, so dass dadurch ein System von etwa $2\frac{1}{2}$ Fuss negativer Brennweite entstand, wie es für mein Auge passte, um ferne Gegenstände gut zu erkennen. Wenn ich durch dieses System sah, und die halbe Pupille verdeckte, entstanden keine farbigen Ränder an der Grenze dunkler und heller Gegenstände mehr. Eben so wenig entstanden dergleichen bei unpassender Accommodation des Auges, so dass das Auge durch dieses Linsensystem wirklich achromatisch gemacht war. Ich konnte aber nicht finden, dass die Schärfe des Sehens in irgend merkbarer Weise zugenommen hätte.

Newton kannte schon die Farbenzerstreuung im Auge; er erwähnt die Farbenränder, welche bei halbverdeckter Pupille erscheinen [1]. Es ist bekannt, dass Newton, weil er irrthümlich voraussetzte, die Dispersion aller durchsichtigen Mittel sei ihrer Brechkraft proportional, zu dem Schlusse kam, dass es keine achromatischen Linsensysteme geben könne. Wunderlicher Weise fand Euler [2] in dieser Beziehung das Richtigere, indem er jedoch dabei von der anderen falschen thatsächlichen Voraussetzung ausging, dass das Auge achromatisch sei, und daraus folgerte, dass Newton's Annahme über die Dispersion falsch sein müsse. Ihm widersprach in dieser Beziehung d'Alembert [3], indem er nachwies, dass im Auge die Farbenzerstreuung nicht merklich zu werden brauche, selbst wenn sie ebenso gross wie in Gläsern sei. Ebenso widersprach Dollond [4], welcher behauptete, dass trotz der Anwendung verschiedener brechender Substanzen im Auge es nicht achromatisch sein könne, da alle einzelnen Brechungen der Lichtstrahlen nach der Axe zu gingen. Wenn wir die bisher stets durch die Erfahrung bestätigte Thatsache als allgemeingültig ansehen, dass bei jeder Brechung des Lichts an der Grenzfläche von beliebigen zwei Substanzen die violetten Strahlen stärker gebrochen werden als die rothen, so ist Dollond's Beweisführung gültig. Dann muss nämlich im Auge jedenfalls bei jeder Brechung das violette Licht sich der Axe mehr nähern als das rothe. Maskelyne [5] hat auch Messungen der Farbenzerstreuung gemacht und gefunden, dass das Intervall der Brennpunkte 0,02 Zoll (0,61 Mm.) betrage, was einem Gesichtswinkel von 15 Sec. entspreche, während man in Fernröhren sie noch bis zu einem Gesichtswinkel von 57 Sec. zulässig finde. Jurin [6] hat die farbigen Ränder unbestimmt gesehener Objecte bemerkt. Wollaston [7] machte auf das eigenthümliche Aussehen des prismatischen Spectrums aufmerksam, welches von der Unfähigkeit des Auges, sich für alle Farben gleichzeitig zu accommodiren, herrührt Eine vollständige Theorie der Erscheinungen bei halbverdeckter Pupille gab Mollweide [8], eine vollständige Bearbeitung sämmtlicher hierher gehörigen Erscheinungen Tourtual. Die ersten genauen Messungen der Farbenzerstreuung des Auges stellte Fraunhofer [9] an, mit Berücksichtigung der von Wollaston und ihm entdeckten festen Linien im Spectrum, später Matthiessen [10].

Trotz aller dieser Untersuchungen hielten manche Naturforscher doch bis in die letzte

---

[1] *Optice.* Lib. I. P. II. Prop. VIII.
[2] *Journal Encyclop.* 1765. II. p. 146. — *Mém. de l'Acad. de Berlin.* 1747.
[3] *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1767. p. 81.
[4] *Philos. Trans.* T. LXXIX. p. 256.
[5] *Philos. Trans.* LXXIX. 258.
[6] Smith's *Optics.* 96.
[7] *Philos. Trans.* 1801. P. I. p. 50.
[8] Gilbert's Annalen. XVII. 328. XXX. 220.
[9] Gilbert's Annalen. LVI. 304. — Schuhmacher's astronom. Abhandlungen. Heft II. S. 39.
[10] *Comptes rendus.* XXIV. 875.

Zeit die Idee von der absoluten Vollkommenheit des Auges und somit auch seiner mehr oder weniger vollkommenen Achromasie fest, wie FORBES [1], VALLÉE [2].

1704. J. NEWTOM *Optics.* B. I. P. II. Prop. VIII*.
1747. L. EULER *Mém. de Berlin.* 1747. p. 285. — 1753. p. 249. — 1754. p. 200.
1767. D'ALEMBERT *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1767. p. 81*.
1789. MASKELYNE *Phil. Trans.* LXXIX. 256*.
1798. COMPARETTI observationes de coloribus apparentibus. Patavini.
1801. TH. YOUNG *Phil. Trans.* 1801. P. I. p. 50*.
1805. MOLLWEIDE in GILBERT's Annalen. XVII. 328. und XXX. 220.
1814. *FRAUNHOFER in GILBERT's Annalen. LVI. 304. — SCHUHMACHER's astronom. Abhandlungen. Altona 1823. Heft II. S. 39.
1826. J. MÜLLER zur vergl. Physiol. des Gesichtssinnes. Leipzig. S. 195. 414*.
1830. *TOURTUAL über Chromasie des Auges. MECKEL's Archiv. 1830. S. 129*.
1837. MILE Poggd. Ann. XLII. 64.
1847. A. MATTHIESSEN *Comptes rendus.* XXIV. 875.; *Institut.* No. 698. p. 162; POGGENDORFF's Ann. LXXI. 578*; FRORIEP's Notizen. III. 341; *Archive d. sciences phys. et natur.* V. 221; Berl. Berichte. 1847. S. 183.
L. L. VALLÉE *Comptes rendus.* XXIV. 1096; Berl. Ber. 1847. S. 184.
1849. J. D. FORBES *Proceed. Edinburgh Roy. Soc.* Decb. 3. 1849. p. 251; SILLIMAN's *Journ.* (2) XIII. 413; Berl. Ber. 1850, p. 492*.
1852. L. L. VALLÉE *Comptes rendus.* XXXIV. 321; Berl. Ber. 1852. S. 308*.

§. 14. Monochromatische Abweichungen.

Ausser der Ungenauigkeit des Bildchens, welche durch die ungleiche Brechung verschiedenfarbiger Lichtstrahlen bedingt ist, kommt bei den optischen Instrumenten, welche Glaslinsen mit sphärischen Flächen enthalten, noch eine zweite Art der Abweichung vor, die Abweichung wegen der Kugelgestalt oder sphärische Aberration, welche darin besteht, dass auch Lichtstrahlen von gleicher Farbe, die von einem Punkte ausgehen, von krummen Flächen im Allgemeinen nicht genau, sondern nur annähernd in einen Punkt wieder vereinigt werden. Es giebt allerdings gewisse krumme Flächen, welche die Lichtstrahlen, die von einem bestimmten leuchtenden Punkte ausgehen, ganz genau in einen Punkt wieder vereinigen (aplanatische Flächen). Es sind dies Rotationsflächen, deren Erzeugungscurve im Allgemeinen durch eine Gleichung vierten Grades gegeben wird. In gewissen Fällen aber, z. B. wenn der leuchtende Punkt in unendlicher Entfernung liegt, ist die Erzeugungscurve eine Ellipse. Auch kann in Systemen von kugeligen brechenden Flächen durch eine passende Combination der Krümmungsradien und Abstände der Flächen die Kugelabweichung auf ein Minimum gebracht werden. Auch solche Systeme nennt man aplanatisch. Uebrigens ist natürlich der Zerstreuungskreis, den das Bild eines in der optischen Axe eines solchen Systems liegenden leuchtenden Punktes bildet, rings um die Axe symmetrisch. Er bildet einen hellen Fleck, dessen Helligkeit in der Axe am stärksten ist, und von da nach allen Seiten hin schnell abnimmt.

Die im Auge vorkommenden monochromatischen Abweichungen sind nicht, wie die sphärische Aberration der Glaslinsen, symmetrisch um eine Axe, sie sind vielmehr unsymmetrisch und von einer Art, wie sie bei gut gearbeiteten

---

[1] *Proc. Roy. Edinb. Soc.* Decbr. 1849. p. 251.
[2] *Comptes rendus.* XXIV. 1096. XXXIV. 321.

optischen Instrumenten nicht vorkommen darf. Diese Art der Abweichung, für welche in Bezug auf Kugelflächen der Name sphärische Aberration, in Bezug auf andere krumme Flächen der Name Abweichung wegen der Gestalt der brechenden Fläche gebraucht wird, wollen wir, da auch die letztere Bezeichnung für das Auge nicht allgemein genug ist, monochromatische Abweichung nennen, da sie einfaches (monochromatisches) Licht ebenso gut betrifft, wie das zusammengesetzte weisse, und sich dadurch von der im vorigen Paragraphen behandelten chromatischen Abweichung unterscheidet.

Die Erscheinungen sind folgende: 1) Man wähle zuerst als Object einen sehr kleinen leuchtenden Punkt (ein mit einer Nadel gestochenes Löchelchen in schwarzem, undurchsichtigem Papier, durch welches Licht fällt) und bringe ihn in eine etwas grössere Entfernung, als die grösste Accommodationsdistanz beträgt, so dass auf der Netzhaut ein kleiner Zerstreuungskreis entsteht. Man sieht alsdann statt des hellen Punktes nicht, wie es in einem schlecht eingestellten Fernrohre der Fall ist, eine kreisförmige Fläche, sondern eine strahlige Figur von vier bis acht unregelmässigen Strahlen, welche in beiden Augen verschieden zu sein pflegt und auch für verschiedene Menschen verschieden ist. Ich habe in *Fig. 65 a* die aus meinem rechten, in *b* die aus meinem linken Auge abgebildet. Die nach der Peripherie gekehrten Ränder der hellen Partien eines von weissem Lichte entworfenen Zerstreuungsbildes dieser Art sind blau gesäumt, die dem Centrum zugekehrten rothgelb. Die Figur scheint bei den meisten Menschen in der Richtung von oben nach unten länger zu sein als von rechts nach links. Ist das Licht schwach, so kommen nur die hellsten Stellen der Strahlenfigur zur Wahrnehmung, und man sieht mehrere Bilder des hellen Punktes, von denen gewöhnlich eines heller ist als die anderen. Ist das Licht dagegen sehr stark, lässt man z. B. directes Sonnenlicht durch eine feine Oeffnung fallen, so fliessen die Strahlen des Sterns in einander, rings umher entsteht ausserdem ein aus unzähligen, äusserst feinen und bunt gefärbten Linien bestehender Strahlenkranz von viel grösserer Ausdehnung, den wir unter dem Namen des Haarstrahlenkranzes von dem sternförmigen Zerstreuungsbilde unterscheiden wollen.



Fig. 65.

Hat man die sternförmige Figur oder bei schwächerem Lichte die mehrfachen Bilder des leuchtenden Punktes vor sich, und schiebt ein undurchsichtiges Blatt von unten her vor das Auge, so schwindet zuerst der scheinbar untere Theil des Zerstreuungsbildes, also der obere Theil des entsprechenden Netzhautbildchens. Schiebt man das Blatt von oben, von rechts oder links vor das Auge, so schwindet dem entsprechend immer der obere, rechte oder linke Theil des Zerstreuungsbildes.

Anders verhält sich der ausgedehntere Haarstrahlenkranz, den sehr intensives Licht erregt. Wenn man die Pupille von unten her verdeckt, verschwindet keineswegs der untere Theil dieses Kranzes, sondern nur der untere Theil des

centralen hellen Sterns. Die Erscheinung wird aber dadurch gestört und verändert, dass sehr lebhafte Diffractionsbilder sich entwickeln, welche von der verengerten und veränderten Gestalt der Pupille bedingt sind.

Die strahlige Gestalt der Sterne und ferner Laternen gehört mit zu diesen Erscheinungen.

2) Ist das Auge für eine grössere Entfernung als die des leuchtenden Punktes accommodirt (zu welchem Zwecke man bei fernen leuchtenden Punkten eine schwache Concavlinse vor das Auge bringen kann), so erscheint eine andere strahlenförmige Figur (*Fig. 65 c* aus meinem rechten, *d* aus meinem linken Auge), deren grössere Ausdehnung meist horizontal ist. Verdeckt man die Pupille von einer Seite her, so schwindet die entgegengesetzte Seite des vom Beobachter gesehenen Zerstreuungsbildes, d. h. die der verdeckten Hälfte der Pupille gleichseitigen Theile des Netzhautbildes. Diese Figur wird also von Strahlen gebildet, welche die Axe des Auges noch nicht geschnitten haben. Wenn sich Thränenflüssigkeit über das Auge verbreitet hat, oder durch häufiges Blinzeln mit den Lidern Fetttröpfchen aus den Meibom'schen Drüsen auf die Hornhaut gekommen sind, ist die Strahlenfigur meist grösser, unregelmässiger, wird durch Blinzeln bedeutend verändert, und wenn man die Pupille von der Seite her verdeckt, verschwindet dadurch nicht blos eine Seite der Strahlenfigur.

3) Bringt man den leuchtenden Punkt in eine solche Entfernung, dass man das Auge für sie accommodiren kann, so sieht man bei mässigem Lichte einen kleinen rundlichen hellen Fleck ohne Unregelmässigkeiten. Bei stärkerem Lichte dagegen bleibt sein Bild bei jeder Weise der Accommodation strahlig, und man findet bei allmäligen Accommodationsänderungen nur, dass die vertical verlängerte Strahlenfigur, welche bei kürzerer Sehweite vorhanden ist, sich verkleinert, rundlicher wird und dann in die horizontal verlängerte Strahlenfigur übergeht, die einer grösseren Sehweite angehört.

4) Wenn man eine feine Lichtlinie betrachtet, kann man sich die Erscheinungen, welche entstehen, leicht dadurch im Voraus entwickeln, dass man die strahligen Zerstreuungsbilder für alle einzelnen Punkte der Linie construirt denkt, die sich nun zum Theile decken. Die helleren Theile der Zerstreuungsbilder fliessen dann zu Lichtlinien zusammen, welche als mehrfache Bilder der hellen Linie erscheinen. Die meisten Augen sehen zwei, manche in gewissen Lagen fünf oder sechs solche Doppelbilder.

Um den Zusammenhang der Doppelbilder von Linien mit den strahligen Bildern von Punkten gleich durch den Versuch anschaulich zu machen, schneide man in ein dunkles Papierblatt eine feine gerade Spalte, und ein wenig von deren Ende entfernt, in Richtung ihrer Verlängerung, steche man ein rundes Löchelchen ein, wie *Fig. 66 a.* Von Ferne sehend, bemerkt man dann, dass die Doppelbilder der Linie genau denselben Abstand von einander haben, wie die hellsten Stellen der strahlenförmigen Zerstreuungsfigur des Punktes, und dass letztere in der Verlängerung der ersteren liegen, wie in *Fig. 66 b*, wo in der Zerstreuungsfigur des hellen Punktes nur die hellsten Theile des Sterns, *Fig. 65 a*, sichtbar sind.



Fig. 66.

Hierher gehören die mehrfachen Bilder, welche die meisten Augen von den Hörnern der Mondsichel sehen.

An den Grenzen heller Flächen, für welche das Auge nicht ganz vollkommen accommodirt ist, machen sich die Doppelbilder auch mitunter dadurch bemerklich, dass am Rande der hellen Fläche der Uebergang von Helligkeit zu Dunkel in zwei oder drei Absätzen geschieht.

Weitere hierher gehörige Erscheinungen folgen unten bei der Lehre von der Irradiation.

5) Das Auge ist im Allgemeinen nicht gleichzeitig für horizontale und verticale Linien, welche in gleicher Entfernung von ihm sich befinden, accommodirt. Man betrachte aufmerksam eine Anzahl gerader Linien, die sich in einem Punkte schneiden, wie *Taf. II. Fig. 5,* in einer Entfernung, für welche man gut accommodiren kann. Man wird bemerken, dass man sie nach einander alle scharf begrenzt und dunkel schwarz sehen kann, während man aber eine von ihnen scharf sieht, sind im Allgemeinen die anderen nicht scharf. Ist man darin geübt, sich der Accommodationsänderungen seines Auges bewusst zu werden, so bemerkt man, dass das Auge eine grössere Sehweite annimmt, um die seinem horizontalen Durchmesser parallelen Linien deutlich zu sehen, mehr für die Nähe dagegen accommodirt, um die senkrechten zu sehen.

Man muss deshalb eine verticale Linie weiter vom Auge entfernen als eine horizontale, wenn man sie beide zu gleicher Zeit deutlich sehen will. Ad. Fick sah verticale Linien in 4,6 Mt. Entfernung deutlich, und zugleich horizontale in 3 Mt., ich selbst zu verticalen in 0,65 Mt., horizontale in 0,54 Mt. Entfernung.

Zeichnet man eine grosse Zahl feiner concentrischer Kreislinien in gleichen Abständen von einander auf Papier, wie in *Taf. II. Fig. 4,* und betrachtet sie in einer Entfernung, für die man gut accommodiren kann, so erscheinen eigenthümliche strahlige Scheine auf der Figur. Bei genauerer Betrachtung erkennt man, dass in den lichteren Radien die schwarzen und weissen Linien scharf von einander geschieden sind, dazwischen aber liegen hellgraue wolkige Stellen, in denen die schwarzen Linien mehr verwaschen erscheinen. Lässt man die Accommodation des Auges oder die Entfernung der Figur vom Auge etwas wechseln, so werden andere Stellen der Figur klar, und es entsteht dadurch der Anschein, als ob die klaren Strahlen sich sehr schnell hin und her bewegten. Richtet man das Auge für eine beträchtlich weitere Entfernung ein, als in der die Figur liegt, so sieht man 8 bis 10 Sectoren mit deutlichen Linien; wo diese an einander stossen, sind sie nebelig, aber man erkennt, dass die schwarzen Linien des einen Sectors nicht mit denen des nächsten zusammenpassen. Die innersten Kreise bekommen dadurch ein seltsam verzerrtes Ansehen.

Dass die beschriebenen Erscheinungen von einer Asymmetrie des Auges herrühren, ist zunächst klar. Ein optisches Instrument, welches um seine Axe ringsum symmetrisch gebaut ist, kann für einen in der Axe liegenden Lichtpunkt allerdings Zerstreuungsfiguren entwerfen, die aber selbst symmetrisch gegen die Axe und kreisförmig gebildet sein müssen.

Was zunächst die strahlige Bildung der kleinen Zerstreuungskreise betrifft, so müssen wir trennen, was davon dauernd ist und jeder Zeit bei reiner Horn-

haut wieder erscheint, und andererseits den Theil der Erscheinung, der durch Thränenfluss und Blinzeln der Augenlider verändert wird. Der letztere Theil rührt offenbar her von Tropfen wässriger oder fetter Flüssigkeit, oder von Unreinigkeiten, die sich auf der Hornhaut angesammelt haben. Man kann diese Erscheinungen nachahmen, wie A. Fick gezeigt hat, wenn man mit einer Glaslinse, auf deren Oberfläche man Wassertropfen ausgebreitet hat, das Bild eines hellen Punktes entwirft.

Dergleichen vergängliche Erscheinungen kommen in den Strahlenfiguren meiner eigenen Augen seltener vor, vielmehr sehe ich gewöhnlich immer dieselben Figuren wieder, welche ich oben in *Fig. 65 a* bis *d* abgebildet habe, und welche durch ihre strahlige Form wohl zunächst an den strahligen Bau [1] der Linse erinnern. In der That konnte ich mich überzeugen, dass die wesentlichsten Züge dieser Strahlenfiguren von Unregelmässigkeiten der Linse herrührten, indem ich die feine Oeffnung, durch welche das Licht fiel, sehr nahe an das Auge brachte; dann sieht man in dem Zerstreuungskreise die sogenannten entoptischen Erscheinungen, welche im nächsten Paragraphen beschrieben werden sollen. Dort wird auch gezeigt werden, in welcher Weise man eine sichere Kenntniss von dem Orte der Objecte im Auge erhalten kann, welche diese Erscheinungen veranlassen. Es fand sich nun, dass gewisse helle und dunkle Streifen, welche dem entoptischen Bilde der Linse angehörten, bei allmälig steigender Entfernung der Oeffnung vom Auge übergingen in die hellen und dunklen Flecken und Streifen der in *Fig. 65 c* und *d* abgebildeten Sternfiguren. Abbildungen dieses Uebergangs hat schon Th. Young [2] gegeben.

Was die zweite Klasse der oben beschriebenen Erscheinungen betrifft, welche sich auf die verschiedene Vereinigungsweite der Strahlen nach der verticalen und horizontalen Richtung beziehen, so lässt sich deren Grund noch nicht mit gleicher Bestimmtheit angeben. Im Allgemeinen muss eine solche Art der Abweichung eintreten, so oft Licht an krummen Flächen gebrochen wird, deren Krümmung nach verschiedenen Richtungen hin verschieden ist, oder auch an Kugelflächen, so oft es schief auf die Fläche fällt. An beiderlei Ursachen kann man im Auge denken. Horizontale und verticale Meridianschnitte der brechenden Flächen des Auges haben vielleicht nicht dieselben Krümmungsradien; und wir wissen ausserdem, dass das menschliche Auge nicht ganz genau centrirt ist, und dass der Ort des directen Sehens nicht in der Linie liegt, welche dem Begriffe einer Augenaxe am nächsten kommt.

Anzuführen ist, dass Th. Young [3], in dessen Auge die beiden Vereinigungsweiten ziemlich beträchtlich differirten, durch einen Versuch ermittelt hat, dass seine Hornhaut diese Differenz nicht bewirke. Er brachte nämlich das Auge unter Wasser, wobei die Brechung in der Hornhaut fast vollständig aufgehoben ward, und fand, dass die Differenz der Vereinigungsweiten noch in gleichem Maasse fortbestand.

Man kann übrigens, wie Th. Young ebenfalls bemerkt hat, diesen Fehler

[1] S. oben Seite 24.
[2] *Philos. Transact.* 1801. I. pl. VI.
[3] *Philos. Transact.* 1801. P. I. p. 40.

des Auges aufheben, wenn man Linsengläser unter einer gewissen Neigung gegen die Augenaxe vor das Auge bringt. Ich fand, dass der Versuch leicht gelingt, und dass ich es durch eine passende Haltung eines schwachen Concavglases dahin bringen konnte, ein System feiner senkrechter Linien gleichzeitig mit einem daneben befindlichen von horizontalen Linien gleich deutlich zu sehen.

Schliesslich ist noch die unvollkommene Durchsichtigkeit der Augenmedien als Grund monochromatischer Abweichungen anzuführen. Die Fasern der Hornhaut und Linse scheinen allerdings durch eine Zwischensubstanz von ziemlich gleichem Brechungsvermögen verbunden zu sein, so dass bei mässiger Lichtstärke diese Theile vollkommen homogen und klar erscheinen. Wenn man aber starkes Licht durch eine Brennlinse auf sie concentrirt, wird das an den Grenzen ihrer Elementarbestandtheile reflectirte Licht stark genug, um sie weisslich trübe erscheinen zu lassen. Von dem durch sie gehenden Lichte wird also, wie dieser Versuch zeigt, ein Theil diffus zerstreut, und muss auch andere Theile der Netzhaut treffen, auf welche das regelmässig gebrochene Licht nicht fällt. In der That bemerkt man, wenn man ein intensives Licht vor einem ganz dunklen Grunde betrachtet, den Grund mit einem nebeligen weissen Scheine übergossen, der in der Nähe des Lichts am hellsten ist. Sowie man das Licht verdeckt, erscheint der umgebende Grund in seiner natürlichen Schwärze. Ich glaube diese Erscheinung durch zerstreutes Licht erklären zu müssen [1].

Ich will die Theorie der Brechung an nicht kugeligen Flächen und der Brechung bei schiefem Einfall an Kugelflächen hier nicht vollständig entwickeln, weil sie vorläufig für die Untersuchung der Brechung im Auge nur von geringem Nutzen sein würde, solange wir nicht genauere Bestimmungen für die Form der brechenden Flächen haben. Es genüge hier, eine derartige Brechung in zwei einfachen Fällen zu betrachten, aus denen die betreffenden Verhältnisse anschaulich werden.

Wir betrachten zuerst die Brechung im Scheitel eines ungleichaxigen Ellipsoides. Es sei in *Fig. 67* die Linie $g\ b$ eine Axe des Ellipsoides, in deren Verlängerung bei p der leuchtende Punkt liegt. Die Ebene der Zeichnung sei ein Hauptschnitt des Ellipsoides, so dass auch noch eine zweite Axe des Ellipsoides $g\ h$ in dieser Ebene liegt. Da nun die Normalen solcher Punkte der ellipsoidischen Fläche, welche in einem Hauptschnitte liegen, auch in demselben Hauptschnitte

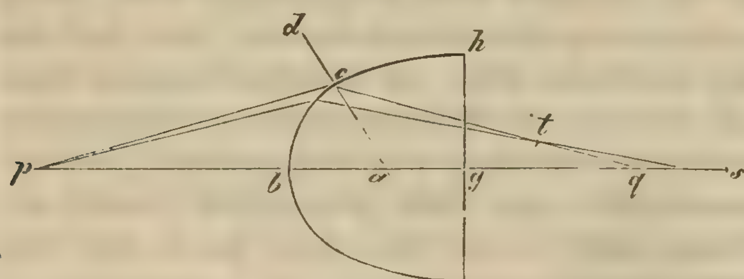


Fig. 67.

liegen, so liegen die Normalen der Curve $b\ c\ h$ in diesem Falle in der Ebene der Zeichnung. Wenn von p aus ein Strahl auf den Punkt c fällt, so liegt der gebrochene Strahl in der durch den leuchtenden Punkt und das Einfallsloth gelegten Ebene, d. h. in der Ebene der Zeichnung, und schneidet also die Axe $b\ g$ in irgend einem ihrer Punkte q. Dies würde nicht der Fall sein, wenn die Ebene der Zeichnung nicht eben ein Hauptschnitt wäre.

Ist $a\ d$ die Normale im Punkte c, so wird die Lage des gebrochenen Strahls nun weiter durch die Bedingung bestimmt, dass

$$\sin \angle\, p\,c\,d = n \sin \angle\, a\,c\,q$$

[1] Helmholtz in Poggd. Ann. LXXXVI. 509.

sein muss, wenn n das Brechungsverhältniss bezeichnet. Diese Bedingung ist also dann ganz dieselbe wie für Rotationsflächen. Die nahe senkrecht bei b auffallenden Strahlen werden dann also einen gemeinschaftlichen Vereinigungspunkt in der Axe haben, dessen Entfernung von dem Krümmungsradius $r_{,}$ der Curve $b\,c\,h$ in b abhängt. Ist p unendlich entfernt, so ist die Vereinigungsweite der Strahlen, d. h. die Brennweite in dem vorliegenden Hauptschnitte gleich $\frac{n\,r_{,}}{n-1}$.

Für die Strahlen von p, welche in dem anderen Hauptschnitte verlaufen, der durch $b\,q$ und die dritte Axe gelegt ist, verhält sich wieder Alles ebenso, nur hat der Krümmungsradius im Scheitel der Fläche einen anderen Werth $r_{,,}$, und die Brennweite der Strahlen in diesem zweiten Hauptschnitte ist gleich $\frac{n\,r_{,,}}{n-1}$.

Der Strahl $p\,q$ wird also von den Strahlen, die in der Ebene der Zeichnung unmittelbar neben ihm liegen, in einem Punkte, etwa q, geschnitten; von den Strahlen dagegen, die in einer durch ihn senkrecht zur Ebene der Zeichnung gelegten Ebene ihm unmittelbar benachbart sind, nicht in demselben Punkte q, sondern in einem anderen Punkte, etwa in s.

Lässt man unter diesen Umständen die Strahlen von p durch eine kleine kreisförmige Oeffnung, deren Mittelpunkt sich in der Axe bei b befindet, auf die brechende Fläche fallen, so ist der Querschnitt des Strahlenbündels unmittelbar bei b ein Kreis, zwischen b und q eine Ellipse, deren senkrecht zur Ebene der Zeichnung gestellte Axe grösser ist als die in der Ebene liegende. Die Ellipse wird immer kleiner und zugleich gestreckter, je mehr wir uns dem Punkte q nähern. In q ist der Querschnitt des Strahlenbündels eine zur Ebene der Zeichnung senkrechte Linie. Weiterhin wird er wieder eine Ellipse, deren grössere Axe senkrecht zur Ebene der Zeichnung steht, die schnell einem Kreise ähnlicher wird, ungefähr in der Mitte zwischen q und s wirklich ein Kreis wird und sich dann in eine Ellipse verwandelt, deren längere Axe in der Ebene der Zeichnung liegt, die sich gegen s hin immer mehr streckt, in s selbst sich in eine gerade Linie zusammenzieht und jenseits s allmälig wieder breiter wird und sich immer mehr der Kreisform nähert.

Aehnlich verhält es sich mit Strahlenbündeln, welche schief auf eine kugelige Fläche fallen. Nehmen wir an, in *Fig.* 67 sei $b\,c\,h$ eine Kugelfläche und $p\,c$ ein solcher schief auffallender Strahl. Wir wissen [1], dass die Strahlen, welche in der Ebene der Zeichnung unmittelbar neben c auf die Fläche fallen, sich mit dem Strahle $p\,c$ nach der Brechung nicht im Brennpunkte und in der Centrallinie $p\,q$, sondern in einem seitwärts von der Axe liegenden Punkte der kaustischen Fläche schneiden. Es sei dieser Punkt t. Denken wir uns dagegen die ganze Figur um die Linie $a\,p$ gedreht, so tritt der Strahl $p\,c$ allmälig an die Stelle anderer Strahlen, welche mit ihm gleich weit von dem Punkte b entfernt auf die Fläche fallen, und der gebrochene Strahl $c\,q$ tritt an die Stelle der dazu gehörigen gebrochenen Strahlen. Diese Strahlen schneiden sich also alle nur im Punkte q.

Während also die in der Ebene der Zeichnung dem Strahle $p\,c$ unmittelbar benachbarten Strahlen ihn in t schneiden, schneiden ihn diejenigen benachbarten Strahlen, die vor und hinter der Ebene der Zeichnung in gleicher Entfernung von b einfallen, in q, und endlich können wir hinzusetzen, dass ihn diejenigen Strahlen, welche weder in der Ebene der Zeichnung noch in gleicher Entfernung von b, wie $b\,c$ ist, auffallen, gar nicht schneiden.

Es ist noch zu erörtern, inwiefern die Diffraction des Lichts in der Pupille von Einfluss auf die monochromatischen Abweichungen des Lichts sein kann. Zu-

---

[1] S. oben S. 43. Fig. 27.

nächst dürfte wohl die Frage aufgeworfen werden, ob die strahlige Form der kleinen Zerstreuungsfiguren nicht von den kleinen Einschnitten des Pupillarrandes veranlasst sei. In der That sieht man eine ausgedehntere strahlige Figur, wenn man nach einem sehr hellen Lichtpunkte durch eine Oeffnung sieht, welche kleiner als die Pupille ist, und deren Ränder nicht ganz feinpolirt sind; doch besteht eine solche Strahlenfigur in der Regel aus sehr feinen, mehr haarförmigen Strahlen mit lebhaften Farben, ähnlich dem schon oben beschriebenen Haarstrahlenkranze des Auges, der sehr helle Lichtpunkte umgiebt, auch wenn man sie nicht durch eine künstliche Oeffnung betrachtet. Dreht man die Oeffnung dann um ihren Mittelpunkt, so dreht sich der ganze Strahlenkranz mit ihr, woraus sich eben ergiebt, dass dieser Strahlenkranz von den Rändern der Oeffnung herrührt.

Von dem Vorhandensein einer Diffraction des Lichts, welche durch die feine Faserung der Krystallinse veranlasst wäre, konnte ich mich an meinem eigenen Auge nicht überzeugen. Wenn ich durch eine glatt gebohrte Oeffnung einer Metallscheibe nach einem kleinen lichten Punkte sehe, so dreht sich immer die ganze Diffractionsfigur, wenn ich die Scheibe drehe. Gehörten einzelne Züge der Diffractionsfigur den Fasern der Hornhaut oder Linse an, so müssten diese stehen bleiben. Dagegen beschreibt Beer [1] aus seinem Auge Diffractionserscheinungen, welche er von einer Faserung der Augenmedien herleitet.

Diese Diffractionsphänomene unterscheiden sich aber von denen der kleinen Zerstreuungskreise wesentlich durch den Umstand, das letztere beim Verdecken der Pupille von einer Seite her auch von einer Seite her verschwinden, während die andere Seite ungestört bleibt. Wenn ein feines Fäserchen oder ein feiner Einschnitt dagegen Diffractionsstrahlen bildet, so erstrecken sich diese niemals blos nach einer Richtung, sondern stets auch nach der entgegengesetzten, weil jede Unterbrechung einer Lichtwelle stets nach entgegengesetzten, meist nach allen Seiten hin ihren Einfluss ausübt. Die Haarstrahlenfiguren zeigen nun wirklich diesen Charakter; sobald man die Pupille anfängt zu bedecken, werden mehr oder weniger alle Theile der Figur gestört und verändert.

Ausser der Diffraction, welche Unregelmässigkeiten des Randes der Pupille bewirken, kommt aber auch noch in Betracht, dass die ganze Pupille als enge kreisförmige Oeffnung Diffraction hervorrufen kann. Jedes Mal, wo Strahlen eines leuchtenden Punktes durch eine oder mehrere brechende Flächen von begrenzter Apertur, die übrigens vollkommen achromatisch und aplanatisch sein mögen, gebrochen werden, entsteht im Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen kein punktförmiges Bild, sondern wegen der Diffraction am Rande der Apertur eine kleine lichte Figur, die abwechselnd helle und dunkle Stellen zeigt, deren Form und Lage im Allgemeinen von der Grösse und Gestalt der Oeffnung abhängig sind. Ist die letztere kreisförmig, wie bei den optischen Instrumenten und im Auge gewöhnlich der Fall ist, so besteht die Diffractionsfigur aus einer hellen Kreisscheibe, umgeben von mehreren dunklen und hellen Ringen von schnell abnehmender Helligkeit. Ist d der Durchmesser der Apertur des brechenden Systems, r der Abstand des Bildes von derselben, l die Wellenlänge des Lichts, so ist der Durchmesser δ der mittleren Kreisscheibe nach der durch die Versuche bestätigten Theorie dieser Erscheinungen

$$\delta = 2{,}440 \, \frac{l\,r}{d}.$$

Setzen wir für mittleres Licht $l = {}^1/_{2000}$ Mm. und r für das Auge gleich 20 Mm., so wird, wenn δ und d in Millimetern ausgedrückt werden,

$$\delta = 0{,}0244 \cdot \frac{1}{d}.$$

[1] Poggendorff's Ann. LXXXIV. 518.

Bei der kleinsten Pupillenweite, die wir gleich 2 Mm. setzen wollen, würde $\delta = 0{,}0122$ Mm. werden. Diese Grösse des Zerstreuungskreises entspricht einem Gesichtswinkel von 2 Min. 6 Sec., und ist gleich der Grösse des Zerstreuungskreises, den in einem für unendliche Entfernung adaptirten Auge ein 25 Mt. entfernter Lichtpunkt entwirft. Da der Gesichtswinkel der kleinsten wahrnehmbaren Distanzen etwa 2 Min. beträgt, so muss bei engster Pupille die Diffraction eben anfangen, die Genauigkeit des Sehens zu beeinträchtigen.

Zu den monochromatischen Abweichungen gehören auch noch die Lichtstreifen, welche nach oben und unten von einem lichten Körper ausgehen, wenn man die Augenlider halb schliesst. Sie rühren von der Brechung des Lichts in dem concaven Flüssigkeitsrande her, der sich an den Lidern erhebt. Dieser Rand wirkt wie ein kleines Prisma oder eine Reihe kleiner Prismen von veränderlichem Winkel, und lenkt das ihn treffende Licht stark von seinem Wege ab.

Die Messungen, welche von verschiedenen Physikern über die Ungleichheit der Brennweite horizontal und vertical divergirender Strahlen ausgeführt worden sind, haben ergeben, dass verschiedene Individuen sich in dieser Beziehung sehr verschieden verhalten. Bei einigen fehlen diese Abweichungen ganz und gar, wie z. B. bei Brücke [1], und wo sie vorkommen, zeigen sie sich in entgegengesetztem Sinne.

Th. Young giebt an, dass sein Auge zu einem Focus sammele vertical divergirende Strahlen eines 10 engl. Zoll (304 Mm.) entfernten leuchtenden Punktes, und horizontal divergirende eines 7 Zoll (213 Mm.) entfernten. Um die Grösse dieses Unterschieds unabhängig von den Sehweiten seines Auges auszudrücken, berechnet er die Brennweite eines Glases, welches im Stande wäre, als Brille gebraucht, die eine Entfernung auf die andere zu reduciren, und findet 23 engl. Zoll (700 Mm.). Um den Fehler seines Auges zu corrigiren, würde er ein Brillenglas mit einer convexen Cylinderfläche von verticaler Axe oder ein solches mit einer concaven Cylinderfläche und horizontaler Axe von der angegebenen Grösse der Brennweite gebraucht haben. A. Fick fand, dass er 4,6 Mt. entfernte Verticallinien und 3 Mt. entfernte Horizontallinien gleichzeitig deutlich gesehen habe. Ich selbst sehe gleichzeitig deutlich 0,65 Mt. entfernte Verticallinien und 0,54 Mt. entfernte Horizontallinien. Der Sinn der Abweichung ist in diesen beiden Fällen der entgegengesetzte wie bei Th. Young, die Grösse eine viel geringere. Durch die Focallänge einer cylindrischen Linse ausgedrückt, entspricht die Abweichung in Fick's Auge einer Brennweite von 8,6 Mt. und in meinem Auge 3,19 Mt. Dergleichen Messungen sind leicht auszuführen, indem man etwa $\frac{1}{2}$ Zoll über einem horizontalen, hinreichend langen Brettchen eine feine Nähnadel horizontal befestigt, und indem man sie vom Ende des Brettchens her betrachtet, eine verticale Nadel vor ihr oder hinter ihr in solcher Entfernung einsticht, dass beide gleich deutlich erscheinen.

A. Fick findet, dass ein unbefangen blickendes Auge sich meist für Verticallinien accommodirt. Um annähernd die Entfernung der beiden Brennebenen berechnen zu können, wollen wir annehmen, dass Listing's schematisches Auge für Verticallinien accommodirt sei. Machen wir die Abweichung der horizontal und vertical divergirenden Strahlen darin ebenso gross wie bei den genannten drei Beobachtern, so würde liegen der Brennpunkt für horizontale Strahlen nach den Angaben von

Th. Young . .	0,422 Mm.	vor dem anderen,
A. Fick . . .	0,035 Mm.	hinter dem anderen.
H. Helmholtz	0,094 Mm.	

Diese Abweichungen sind, wie man sieht, kleiner als die des rothen und violetten Brennpunktes (0,6 Mm.). Sie beeinträchtigen die Schärfe des Sehens auch so lange nicht sehr wesentlich, als es darauf ankommt, Linien von einander zu unterscheiden, die irgend einer Hauptrichtung folgen. Nur wo gekreuzte Linien gleichzeitig scharf gesehen werden sollen, treten sie hindernd auf.

[1] Fortschritte der Physik im Jahre 1845. Bd. I. S. 211.

Die mehrfachen Bilder eines Punktes oder einer Linie bei ungenauer Accommodation haben schon DE LA HIRE [1] und JURIN [2] erwähnt, ohne aber die richtige Erklärung zu finden. Später beschrieb und bildete TH. YOUNG [3] die Form der Zerstreuungsfiguren ab bei verschiedener Entfernung des leuchtenden Punktes, und spricht die Vermuthung aus, dass die Strahlen von leichten Ungleichförmigkeiten der vorderen Linsenfläche herrühren möchten. Später erwähnt sie HASSENFRATZ [4], welcher denselben Grund voraussetzt und sie als Schnittlinien von zwei kaustischen Flächen bezeichnet. PURKINJE [5] beschreibt die Erscheinungen der mehrfachen Bilder, ferner die, welche beim Anschauen feiner paralleler Linien eintreten, und bildet die Sternfigur ab; er glaubt sie am besten von Hornhautfacetten ableiten zu können. Mehrfache Bilder einer hellen Linie hat auch PÉCLET [6] gesehen und erkannt, dass sie durch eine besondere Structur der brechenden Flächen veranlasst sein müssten. Ebenso NIEDT [7], GUÉRARD [8], FLIEDNER [9]. Letzterer hat die hierher gehörigen Erscheinungen ausführlich in ihrem Zusammenhange beschrieben. TROUESSART [10] glaubt einen netzförmigen dunklen Schirm hinter den brechenden Flächen des Auges annehmen zu müssen, dessen mehrfache Oeffnungen nach dem Principe des SCHEINER'schen Versuchs die mehrfachen Bilder veranlassten. Die Ansicht über ihre Entstehung von A. FICK [11] ist oben schon erwähnt. Erwähnt werden hierher gehörige Erscheinungen noch von AIMÉE [12] und CRANMORE [13]. Eine ganz eigenthümliche Ansicht über den Ursprung der mehrfachen Bilder, die *Polyopia monophthalmica* der Augenärzte, hat STELLWAG VON CARION [14] aufgestellt. Er glaubte beobachtet zu haben, dass die verschiedenen Bilder nach verschiedenen Richtungen polarisirtes Licht erhalten. Indessen ist dies nicht richtig; Herr CARION ist bei seinen Versuchen wahrscheinlich durch eine schlecht geschliffene Turmalinplatte mit schwach gewölbten Flächen oder Streifen im Innern getäuscht worden. Eine schwach cylindrische Fläche einer solchen Platte würde, vor das Auge gehalten, bald in horizontaler, bald in verticaler Richtung die Strahlen zur Vereinigung bringen und dadurch einzelne der Doppelbilder beseitigen können. Um den Einfluss solcher Mängel der Platte aufzuheben, stelle man sie zwischen das Licht und einen Schirm mit enger Oeffnung, so dass polarisirtes Licht durch die Oeffnung fällt, während der Beobachter diese Oeffnung aus hinreichender Entfernung betrachtet, um sie sternförmig zu sehen. Man lasse nun die polarisirende Platte herumdrehen, so dass die Polarisationsrichtung des Lichts wechselt. Dann ist nicht der geringste Einfluss der Polarisationsrichtung auf die Doppelbilder zu erkennen. Uebrigens lassen sich die von CARION angeblich gewonnenen Resultate auch nicht mit den bekannten Gesetzen der Doppelbrechung vereinigen. Widerlegt worden ist er durch GUT [15]. Die medicinische Literatur über das pathologische Vorkommen auffallenderer *Diplopia monophthalmica* findet sich in dem Aufsatze von CARION zusammengestellt.

Ueber Diffractionserscheinungen des Auges sind Beobachtungen gemacht von BAUDRIMONT [16], WALLMARK [17], BEER [18]. Die Lichtstreifen, welche bei halb vorgeschobenen Augenlidern durch den concaven Thränenrand an ihren Rändern entstehen, hat MEYER [19] (in Leipzig) besprochen.

Die Asymmetrie des Auges in seinen verschiedenen Meridianebenen finde ich zuerst von TH. YOUNG [20] besprochen, welcher dabei anführt, dass ein Herr CARY ihm als Thatsache angeführt habe, dass viele Personen ihre Brillengläser schief gegen das Auge halten müssten, um gut durch sie zu sehen. Weitere darauf bezügliche Beobachtungen finden sich von AIRY [21],

---

1 *Accidens de la vue.* p. 400.
2 SMITH's *Optics. Essay on distinct and indistinct visione.* p. 156.
3 *Philos. Transactions.* 1801. I. p. 43. Pl. VI.
4 *Ann. de Chimie.* 1809. T. LXXII. p. 5.
5 Beiträge zur Kenntniss des Sehens. S. 113—119. Neue Beiträge z. Kenntniss d. Sehens. S. 139—146. 173.
6 *Ann. d. Chimie et d. Phys.* LIV. 379. — POGGENDORFF's Ann. XXXIV. S. 557.
7 De dioptricis oculi coloribus ejusque Polyopia. Dissert. Berolini 1842.
8 *Institut.* 1845. No. 581. p. 64.
9 POGGENDORFF's Ann. LXXXV. S. 321. 460. LXXXVI. 336. *Cosmos,* I. 333.
10 *C. R. de l'Acad. d. sciences.* XXXV. 134—136. 398. *Archive de Genève.* XX. 305. *Institut.* 1852. p. 304.
11 HENLE u. PFEUFFER Zeitschrift. N. Folge V. S. 277.
12 *Ann. d. Chimie et d. Physique.* LVI. 108. POGGENDORFF's Ann. XXXIII. S. 479.
13 *Philos. Magazine.* (3) XXXVI. 485.
14 Wiener Sitzungsberichte. VIII. 82. Denkschriften d. k. k. Akad. V. 2. p. 172.
15 Ueber Diplopia monophthalmica. Dissert. Zürich 1854.
16 *C. R. d. l'Acad. d. sc.* XXXIII. 496; *Institut.* No. 931; *Phil. Magaz.* (4) II. 575.
17 POGGENDORFF's Ann. LXXXII. 129.
18 POGGENDORFF's Ann. LXXXIV. 518.
19 POGGENDORFF's Ann. LXXXIX. 429.
20 *Phil. Transact.* 1801. I. p. 39.
21 *Edinb. Journal of Sc.* XIV. p. 322.

Fischer[1], Challis[2], Heineken[3], Hamilton[4], Schuyder[5], welcher Letztere Cylinderlinsen dagegen verfertigen liess, endlich A. Fick. Eine vollständigere Zusammenstellung der Beobachtungen findet sich in Fechner's Centralblatt (Jahrgang 1853. p. 73—85. 96—99. 374—379. 558—561.).

Die Frage nach der sphärischen Abweichung des Auges in dem Sinne, wie dieser Ausdruck für künstliche Instrumente gebraucht wird, verliert neben den beschriebenen viel gröberen Abweichungen, die im Auge vorkommen, ihre Wichtigkeit. Ausser der im vorigen Paragraphen schon erwähnten Beobachtung von Th. Young mit seinem Optometer, wonach dessen Faden, durch vier Oeffnungen gesehen, vierfach erschien und sich die vier scheinbar vorhandenen Fäden bei der Accommodation für die Nähe nicht in einem Punkte kreuzten, hat auch Volkmann[6] sich bemüht, durch Versuche über die Frage zu entscheiden, ob das Auge sphärische Aberration besitze. Er und einige andere Personen blickten durch einen Schirm mit vier Oeffnungen, die in einem Bogen standen, nach einer Nadel, die in verschiedene Entfernungen vom Auge gebracht wurde. Wenn das Auge die mittleren Strahlen eher vereinigt als die Randstrahlen, werden sich bei dem Versuche, indem man die Nadel vom Auge entfernt und dem Punkte des deutlichen Sehens nähert, die Bilder der Nadel, welche den mittleren Oeffnungen angehören, eher vereinigen als die der seitlichen Oeffnungen. Werden die Randstrahlen eher vereinigt als die Centralstrahlen, so wird es umgekehrt sein. Volkmann fand bei verschiedenen Individuen in dieser Beziehung ein entgegengesetztes Verhalten. Bei regelmässig gebildeten brechenden Rotationsflächen würden die angegebenen Versuche von Young und Volkmann in der That über die Art und Grösse der sphärischen Abweichung des Auges Aufschluss geben. Indessen werden in den meisten Meridianebenen der meisten Augen die Punkte, wo die gebrochenen Strahlen den Centralstrahl treffen, gar keine continuirliche Reihe bilden, so dass der Begriff der sphärischen Abweichung hier gar nicht passt.

1694. de la Hire *Accidens de la vue* in den *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1694. p. 400.
1738. Jurin *Essay on distinct and indistinct vision.* p. 156 in R. Smith's *Optics.*
1801. Th. Young in *Philos. Transactions for* 1801. I. p. 43*.
1809. Hassenfratz *Ann. de Chimie.* T. LXXII. p. 5.
1818. Fischer Berliner Denkschriften für 1818 u. 1819. S. 46.
1819. Purkinje Beiträge zur Kenntniss des Sehens. Prag. S. 113—119*.
1824. Péclet *Ann. d. Chimie et d. Phys.* LIV. 379; Poggendorff's Ann. XXXIV. S. 557.
Aimée *Ann. d. Chim. et d. Phys.* LVI. p. 108.
1825. Purkinje Neue Beiträge zur Kenntniss des Sehens. Berlin. S. 139—146. 173*.
Brewster *Edinb. Journal of Science.* XIV. p. 322. (Ueber Airy's Auge).
1842. Niedt de dioptricis oculi coloribus ejusque Polyopia. Dissert. Berolini*.
1845. Guérard *Institut.* No. 581. p. 64.
1846. Volkmann, Artikel: Sehen, in R. Wagner's Handwörterbuch der Physiologie.
1847. Challis in *Philos. Magazine.* (3) XXX. p. 366; *Transact. of the Cambridge Phil. Soc.* II.
1848. H. Meyer in Henle u. Pfeuffer Zeitschr. für rat. Med. V. 368.
Heineken *Philos. Magazine.* (3) XXXII. p. 318.
Hamilton in Froriep's Notizen. VII. 219.
Schnyder Verhandl. d. schweizer. naturf. Gesellsch. 1848. p. 15.
1849. Wallmark Oefvers. af Akad. förhandlingar. 1849. p. 41; Poggendorff's Ann. LXXXII. 129.
1850. Cranmore in *Philos. Magaz.* (3) XXXVI. p. 485.
Baudrimont *Comptes rend. de l'Acad. d. sc.* XXXIII. 496; *Institut.* No. 931; *Philos. Magaz.* (4) II. 575.
1851. Beer Poggd. Ann. LXXXIV. S. 518.
A. Fick de errore optico quodam asymmetria bulbi oculi effecto. Marburg. Auszug in Henle u. Pfeuffer Zeitschr. für rat. Med. Neue Folge. II. S. 83.
1852. *Fliedner Beobachtungen über Zerstreuungsbilder im Auge, sowie über die Theorie des Sehens. Poggendorff's Ann. LXXXV. S. 321*. 460*. LXXXVI. 336*; Moigno *Cosmos.* I. 333

---

[1] Berl. Denkschriften 1818 u. 1819. S. 46.
[2] *Transact. of the Cambridge Phil. Soc.* II.; *Phil. Magaz.* (3) XXX. 366.
[3] *Phil. Magaz.* XXXII. 318.
[4] Froriep's Notizen. II. 219.
[5] Verhandl. d. schweizer. naturf. Ges. 1848. p. 15; Froriep's Notizen. X. 346; *Arch. de Genève.* X. 302.
[6] De errore quodam optico asymmetria bulbi effecto. Marburgi 1851; Henle u. Pfeuffer Zeitschrift. N. Folge Bd. II. S. 85.
[7] R. Wagner's Handwörterbuch für Physiol. Artikel: Sehen.

1852. Trouessart *Comptes rend. d. l'Acad. d. sc.* XXXV. p. 134—136. 398; *Archive de Genève.* XX. 305; *Institut.* 1852. p. 304.
Stellwag von Carion Wiener Sitzungsber. VIII. 82; Denkschr. d. k. k. Akad. V. 2. S. 172; Zeitschrift d. Aerzte zu Wien. 1853. Heft 10 u. 11; Fechner's Centralblatt. 1854. 281—292.
1853. Meyer (in Leipzig) Poggd. Ann. LXXXIX. S. 429.
1854. A. Fick in Henle u. Pfeuffer Zeitschr. N. Folge. V. 277.
Gut über Diplopia monophthalmica. Dissert. Zürich.

§. 15. Die entoptischen Erscheinungen.

Das in das Auge einfallende Licht macht unter gewissen Bedingungen eine Reihe von Gegenständen sichtbar, welche sich im Auge selbst befinden. Solche Wahrnehmungen nennt man entoptische. Unter gewöhnlichen Umständen werfen kleine dunkle Körper, die im Glaskörper oder der Linse und wässrigen Feuchtigkeit schweben, keinen sichtbaren Schatten, und werden deshalb nicht bemerkt. Der Grund davon ist, dass durch jeden Theil der Pupille meist gleichmässig Licht eindringt, und somit für die Beleuchtung der hinteren Augenkammer die ganze Pupille gleichsam die leuchtende Fläche bildet. Es ist aber bekannt, dass, wenn Licht von einer sehr breiten Fläche ausgeht, nur breite Gegenstände, oder solche Gegenstände, welche der den Schatten auffangenden Fläche sehr nahe sind, einen sichtbaren Schatten werfen.

Nun giebt es im Auge allerdings Gegenstände, nämlich die Gefässe der Netzhaut, welche sehr nahe vor der lichtempfindenden Fläche des Auges sich befinden, und daher immer einen Schatten auf die dahinter liegenden Theile der Netzhaut werfen. Aber eben weil diese Theile der Netzhaut hinter den Gefässen immer beschattet sind, und der beschattete Zustand für sie der normale ist, nehmen sie ihn nur unter besonderen Umständen wahr, welche wir weiter unten näher besprechen wollen.

Zunächst wende ich mich zu den in den durchsichtigen Mitteln des Auges enthaltenen kleinen schattengebenden Körpern. Um sie wahrzunehmen, muss man Licht von einer sehr kleinen leuchtenden Stelle, welche sich sehr nahe vor dem Auge befindet, in das Auge fallen lassen. Zu dem Zwecke kann man entweder das im Focus einer kleinen Sammellinse entworfene Bild einer fernen Lichtflamme nahe vor das Auge bringen, oder ein kleines gut polirtes metallisches Knöpfchen, welches von der Sonne oder einer Lampe beschienen wird, oder einen Schirm von dunklem Papier, welcher Licht durch eine sehr kleine Oeffnung einfallen lässt.



Fig. 68.

Am zweckmässigsten ist es, eine Sammellinse von grosser Apertur und kleiner Brennweite *a Fig. 68* aufzustellen; vor ihr in einiger Entfernung eine Lichtflamme *b*, von der die Linse in ihrem Brennpunkte ein verkleinertes Bild entwirft. Dann stellt man hier einen undurchsichtigen dunklen Schirm *c* mit kleiner Oeffnung so auf, dass das Bild der Flamme auf diese Oeffnung fällt. Durch die Oeffnung dringt dann ein breiter Kegel divergirender Strahlen. Ein Auge *o*, welches der Oeffnung sehr genähert wird, erblickt durch sie hindurch die breite,

gleichmässig erleuchtete Fläche der Linse, auf welcher sich nun mit grosser Deutlichkeit die entoptisch wahrzunehmenden Gegenstände darstellen. Wenn wie in *Fig. 69* der leuchtende Punkt *a* zwischen dem Auge und seinem vorderen Brennpunkte *f* liegt, entwerfen die Augenmedien ein entfernteres, vor dem Auge liegendes Bild α von *a*, und die Strahlen durchdringen den Glaskörper in Richtungen, welche von α aus divergiren. Unter diesen Umständen wird von einem im Glaskörper befindlichen dunklen Körper *b* ein Schatten β auf der Netzhaut entworfen, welcher grösser ist als *b*.

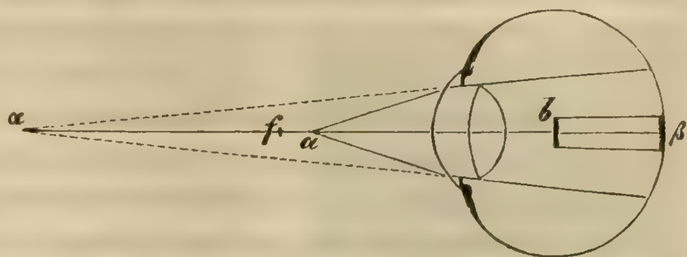


Fig. 69.

Wenn wie in *Fig. 70* der leuchtende Punkt *a* im vorderen Brennpunkte des Auges liegt, werden die von *a* ausgegangenen Strahlen im Glaskörper parallel sein, und von einem im Glaskörper befindlichen dunklen Körperchen *b* wird ein Schatten β von gleicher Grösse entworfen. Liegt endlich der leuchtende Punkt vom Auge weiter entfernt als der vordere Brennpunkt des Auges *f*, wie in *Fig. 71*, so fällt das Bild von *a* hinter das Auge nach α, und die Strahlen convergiren im Glaskörper nach α hin. Der Schatten β von *b* ist dann kleiner als *b*.

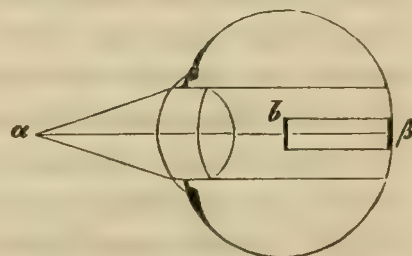


Fig. 70.

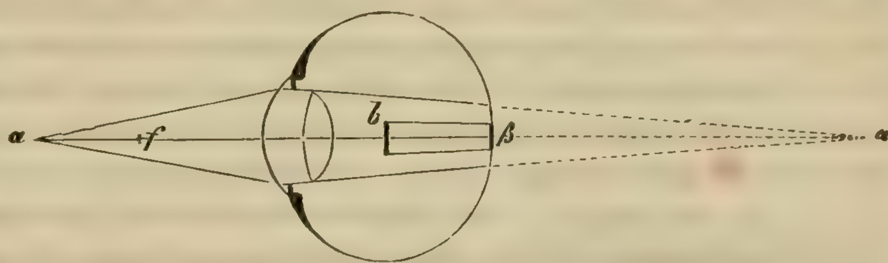


Fig. 71.

Dem entsprechend bemerkt man, dass die entoptisch sichtbar gewordenen Gegenstände sich scheinbar vergrössern, wenn man das Auge dem leuchtenden Punkte nähert; sich verkleinern, wenn man es von ihm entfernt.

Die bei diesen Versuchen beleuchtete Stelle der Netzhaut ist der Zerstreuungskreis des leuchtenden Punktes. Auf diesem werden die Schatten der entoptisch wahrgenommenen Gegenstände entworfen. Diese Schatten sind zwar scharf genug, dass man die Gestalt der Objecte ziemlich gut erkennen kann, wenn die Lichtquelle klein genug ist, aber sie bilden doch niemals ganz vollkommen scharfe Bilder, weil das Licht in Wirklichkeit doch nicht von einem einzigen Punkte, sondern stets von einer, wenn auch kleinen, leuchtenden Fläche kommt. Das von den Augenmedien entworfene Bild dieser Fläche ist für die auf der Netzhaut zu entwerfenden Schatten die Lichtquelle, welche natürlich stets einige Ausdehnung haben wird. Während punktförmige Lichtquellen scharf gezeichnete Schatten entwerfen würden, entwerfen ausgedehntere Lichtquellen Schatten, deren Umrisse allmälig durch Halbschatten in die helle Fläche übergehen, und die deshalb minder scharf gezeichnet sind. Im Allgemeinen werden deshalb die

entoptischen Wahrnehmungen desto schärfer gezeichnet, je feiner die Oeffnung ist, durch welche das Licht dringt, und ausserdem je näher der schattengebende Körper der Netzhaut sich befindet. Aber natürlich muss man bei engeren Oeffnungen auch intensiveres Licht zur Beleuchtung benutzen. Ausserdem kommt bei sehr engen Oeffnungen noch eine andere Erscheinung zum Vorschein, welche die Deutlichkeit der Zeichnung beeinträchtigt. Es bilden sich nämlich durch die Diffraction am Rande des schattengebenden Körpers Diffractionsfransen, helle und dunkle Linien, welche dem Umrisse des Schattens folgen. Dergleichen Diffractionsfransen entstehen überall, wo punktförmige, hinreichend intensive Lichtquellen Schatten werfen. Bei den gewöhnlichen Lichtquellen von grösserer Breite verschwinden diese Fransen im Halbschatten.

Wenn das Auge oder der leuchtende Punkt seine Stellung verändert, so verschieben sich die Schatten der Körper, welche verschieden weit von der Netzhaut abstehen, in verschiedener Weise, und nehmen dadurch eine verschiedene gegenseitige Lage an. Man kann, wie Listing gezeigt hat, diesen Umstand benutzen, um den Ort im Auge ungefähr zu bestimmen, wo sich die schattengebenden Körperchen befinden. Das entoptische Gesichtsfeld ist begrenzt durch den kreisförmigen Schatten der Iris. Wenn wir nach einander verschiedene Punkte des kreisförmigen Feldes fixiren, verschieben sich die Schatten aller Körper, welche nicht in der Ebene der Pupille liegen, gegen die kreisförmige Begrenzung des Gesichtsfeldes. Diese Bewegung der Schatten in dem entoptischen Gesichtsfelde nennt Listing die relative entoptische Parallaxe; er nennt sie positiv, wenn die Bewegung des betreffenden Schattens die gleiche Richtung hat mit der Richtung des Visirpunktes, negativ, wenn sie entgegengesetzte Richtung hat. Die relative entoptische Parallaxe ist Null für Objecte, welche in der Ebene der Pupille liegen, positiv für Objecte hinter der Pupille, negativ für Objecte vor der Pupille. Für Objecte, welche der Netzhaut sehr nahe liegen, ist die Verschiebung der Schatten fast ebenso gross wie die des Visirpunktes, so dass diese den Visirpunkt bei seinen Bewegungen überall hin begleiten, wenn sie nicht durch wirkliche Bewegungen in der Flüssigkeit des Glaskörpers aus der Gesichtslinie entfernt werden.

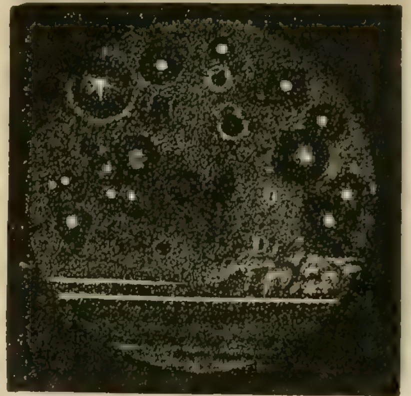
Der Schatten auf der Netzhaut ist ebenso gerichtet wie der schattenwerfende Körper; da aber, was auf der Nelzhaut oben ist, im Gesichtsfelde unten erscheint, so erscheinen die entoptisch gesehenen Gegenstände im Gesichtsfelde stets verkehrt.

Was man entoptisch wahrnehmen kann, ist Folgendes:

1) Begrenzt ist das helle Feld durch den Schatten der Iris; es ist deshalb nahe kreisrund, entsprechend der Form der Pupille. Hat der Pupillarrand der Iris Einschnitte, Falten oder Vorsprünge, wie dies in vielen Augen der Fall ist, so sind dergleichen auch in dem entoptischen Bilde zu erkennen. Auch die Erweiterung und Verengerung der Pupille kann man entoptisch beobachten, am leichtesten, wenn man das andere Auge abwechselnd mit der Hand verdeckt und wieder frei lässt. Sobald Licht in dieses Auge fällt, verengern sich die Pupillen beider Augen, und man erkennt diese Verengerung leicht im entoptischen Bilde.

2) Von den Flüssigkeiten herrührend, welche die Hornhaut überziehen (Thrä-

nenfeuchtigkeit, Secret der Augenliderdrüsen), nimmt man oft im entoptischen Gesichtsfelde Streifen wahr, wolkig-helle oder lichtere Stellen, tropfenähnliche Kreise mit heller Mitte, welche durch Blinzen mit den Augenlidern schnell verwischt und verändert werden. Dergleichen sind dargestellt in *Fig.* 72[1]. Sie sind meist in schnellem Zerfliessen begriffen und haben eine selbständige Bewegung von oben nach unten. Die Streifen sind am stärksten ausgeprägt dicht am Rande der Augenlider, wenn man die Lider vor die Pupille treten lässt, und sind der Ausdruck der capillaren concaven Flüssigkeitsschicht, welche sich von der Hornhaut auf den Rand der Augenlider herüberzieht. Die Tropfen entstehen wohl durch capilläre Anhäufungen der feuchten Schicht um Schleimklümpchen, Staubtheile u. dgl. Die helle Stelle in der Mitte der Tropfen bildet oft ein unvollkommenes optisches Bild von der Lichtquelle, ist z. B. dreieckig, wenn das Licht durch eine dreieckige Oeffnung in das Auge fällt. Dies Bild der Lichtquelle steht scheinbar aufrecht im entoptischen Gesichtsfelde, während es auf der Netzhaut verkehrt sein muss. Die Ansammlungen von Flüssigkeit auf der Hornhaut bilden hierbei kleine Convexlinsen, welche hinter sich ein umgekehrtes Bild der vor ihnen liegenden Gegenstände entwerfen. Der Bewegung dieser Gebilde im Gesichtsfelde von oben nach unten entspricht eine wirkliche Bewegung nach oben, welche wohl dadurch bedingt wird, dass das obere Augenlid, während es gehoben wird, die zähen Schleimtheile nachzieht.


Fig. 72.

3) Die kraus gewordene Vorderfläche der Hornhaut, nachdem man eine Zeit lang das geschlossene Auge mit den Fingern gedrückt oder gerieben hat. Man sieht ziemlich gleichförmig vertheilt grössere, unbestimmt begrenzte, wellige oder netzartig geordnete Linien und getigerte Flecken, die sich eine Viertelstunde bis zu einigen Stunden halten. Es sind dergleichen dargestellt in *Fig.* 73. Zuweilen bleiben auch in dem Netze dieser Linien einzelne unveränderte glatte Stellen stehen, welche darauf schliessen lassen, dass hier die Hornhaut eine andere Art der Consistenz habe.


Fig. 73.

Ausserdem finden sich, von der Hornhaut herrührend, zuweilen constante dunkle Flecken und Linien vor, welche sich nicht ändern und wohl meist Reste von Entzündungen und Verletzungen sind.

4) Von der Linse, namentlich der vorderen Kapselwand, und dem vorderen Theile des Krystallkörpers rühren mannigfache Erscheinungen her. Listing beschreibt folgende vier Formen:

---

[1] Wegen der Unmöglichkeit, diese und die folgenden Figuren im Holzschnitte genügend auszuführen, werden später auf einer der Tafeln bessere Copien davon geliefert werden.

a) Perlflecken, runde oder rundliche Scheibchen, innen hell, mit scharfem, dunklem Rande. Sie sehen bald Luftbläschen, bald Oeltropfen, bald Krystallchen ähnlich, welche man durch das Mikroskop sieht (s. *Fig. 74*); Listing hält sie für Schleimmassen in der Morgagni'schen Feuchtigkeit.

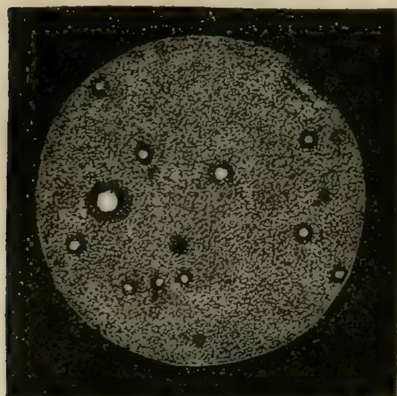


Fig. 74.



Fig. 75.

b) Dunkle Flecken; unterscheiden sich von den vorigen durch den Mangel eines hellen Kerns und auch durch grössere Mannigfaltigkeit der Gestalt. Sie scheinen partielle Verdunkelungen der Kapsel oder Linse zu sein (s. *Fig. 75*).

c) Helle Streifen, meist einen unregelmässigen Stern mit wenig Ausläufern in der Mitte des Gesichtsfeldes darstellend (*Fig. 76*). Listing hält sie für das Bild eines nabelförmigen Gebildes mit naht- oder wulstähnlichen Zweigen in der vorderen Kapselmembran, herrührend von der im Fötalzustande erfolgenden Trennung dieses Kapseltheils von der Innenseite der Hornhaut.

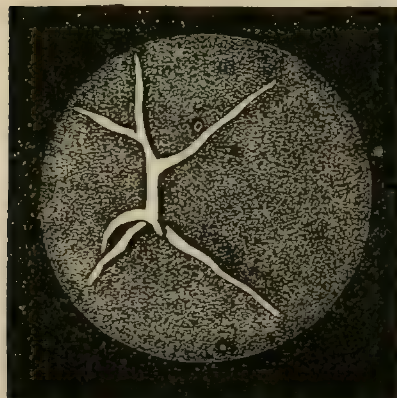


Fig. 76.

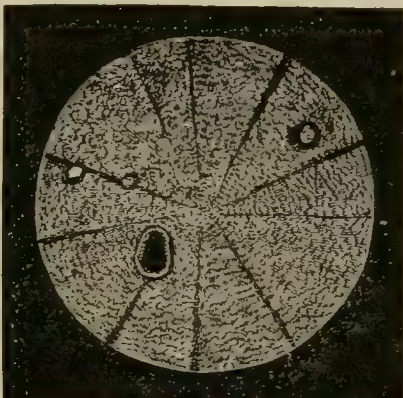


Fig. 77.

d) Dunkle radiale Linien (*Fig. 77*), welche wohl Andeutungen des strahligen Baues der Linse sind.

Einzelne von den genannten Formen scheinen fast in jedem Auge sichtbar zu sein, wenige Augen sind ganz frei davon.

5) Bewegliche Gebilde im Glaskörper, die sogenannten fliegenden Mücken (*Mouches volantes*), welche theils als Perlschnüre, theils als vereinzelte oder zusammengruppirte Kreise mit hellem Centrum, theils als unregelmässige Gruppen sehr feiner Kügelchen, theils als blasse Streifen, ähnlich den Falten einer sehr durchsichtigen Membran, erscheinen. Da viele von ihnen sehr nahe vor der Netzhaut sich befinden, sieht man sie oft ohne weitere Hülfsmittel, indem man nach einer breiten, gleichmässig erleuchteten Fläche, z. B. dem hellen Himmel, blickt. Dass sie sich nicht blos scheinbar, sondern wirklich bewegen, bemerkt man leicht, wenn man bei aufrechter Haltung des Kopfes, z. B. durch eine Fensterscheibe, nach dem Himmel blickt, und einen mit einem Merkzeichen versehenen Punkt des Glases fixirt. Dann sieht man die entoptischen Erscheinungen meistens langsam im Gesichtsfelde herabsinken. Senkt man den Blick und hebt ihn wieder, so folgen die Mücken dieser Bewegung des Visirpunktes, schiessen aber

gewöhnlich etwas über das Ziel hinaus und sinken dann wieder. Nach einer Bewegung des Auges dagegen, welche von oben nach unten gerichtet ist, tritt ein solches Schwanken über das Ziel hinaus nicht ein, auch nicht bei seitlichen Bewegungen. Beobachtet man dagegen bei senkrecht nach unten oder oben gerichteter Gesichtslinie, so liegen die Mücken ziemlich ruhig. Sehr leicht lässt man sich aber bei diesen Beobachtungen verleiten, den Blick nach einer solchen dem Gesichtspunkt naheliegenden Mücke richten zu wollen, um sie durch directe Fixation deutlicher zu sehen. Dann fliegt die entoptische Erscheinung vor dem Visirpunkte einher, ohne natürlich je von ihm erreicht werden zu können. Gerade auf diese Eigenthümlichkeit der Erscheinung bezieht sich wohl der Name der *Mouches volantes.* Man verwechsle diese scheinbare Bewegung nicht mit einer wirklichen, und achte bei den Beobachtungen der letzteren darauf, einen äusseren Gesichtspunkt ganz fest zu fixiren.

Um solche bewegliche Objecte mit Ruhe betrachten zu können, wählt man am besten eine Lage des Kopfes, wo das Auge vertical nach unten oder nach oben sieht, weil dann die Bewegungen der schwimmenden Körperchen aufhören. Uebrigens kann man Mücken, welche seitlich im Gesichtsfelde liegen, zwingen, nach der Stelle des deutlichsten Sehens heranzuschwimmen, wenn man das Auge erst recht schnell in der Richtung bewegt, nach welcher sie vom Visirpunkt aus liegen, und dann langsam zurückbewegt.

Donders und Doncan [1] unterscheiden folgende Formen dieser Objecte:

a) Grössere isolirte Kreise, bald mit dunkleren, bald mit blasseren Umrissen, in der Mitte heller, meist noch mit einem schmalen Lichtkreis umgeben. Sie haben zwischen $\frac{1}{28}$ und $\frac{1}{120}$ Mm. Durchmesser, und sind $\frac{1}{3}$ bis 3 oder 4 Mm. von der Netzhaut entfernt, kommen aber auch in der Nähe der Linse vor. Ist das Auge lange ruhig gewesen, so zeigen sich nur wenige; sie kommen namentlich, und zwar scheinbar von unten her, zum Vorschein durch eine schnelle Bewegung des Auges von unten nach oben, der plötzlicher Stillstand folgt, und senken sich dann wieder langsam nach unten. Ihre Bewegung kann für die dunkelsten in einer Ausdehnung von $1\frac{1}{2}$ Mm. direct beobachtet werden, und ist wahrscheinlich viel ausgedehnter. Ihre seitlichen Bewegungen bei seitlichen Bewegungen des Auges findet Doncan beschränkt. In meinen eigenen Augen kann ich einen solchen Unterschied nicht wahrnehmen. Wenn ich den Kopf auf die Seite lege, so finde ich, dass die Mücken jetzt ebenso schnell und weit scheinbar nach dem Erdboden zu sinken, in Wirklichkeit nach dem aufwärts gewendeten Augenwinkel emporsteigen, wie bei aufrechter Haltung des Kopfes. Bei der letzteren Haltung erscheinen die seitlichen Bewegungen der Mücken allerdings beschränkter als die absteigenden, weil sie seitlich eben nur die Bewegungen des Visirpunktes mitmachen. Eine Bewegung derselben parallel der Gesichtslinie gelang nicht zu constatiren. Viele, obgleich scheinbar von einander getrennt, scheinen sich immer in gleichem Abstande zu begleiten, oder bleiben in derselben Beziehung zu anderen Formen, so dass man berechtigt ist,

---

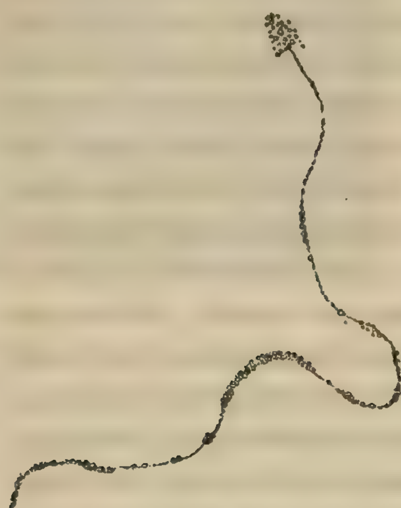
[1] Andreas Doncan Dissert. de corporis vitrei struct. Trajecti ad Rhenum 1854. — Onderzoekingen gedaan in het physiologisch Laborat. der Utrecht'sche Hoogeschool. Jaar VI. 171.

auf einen unsichtbaren Zusammenhang zu schliessen. Ihnen entsprechend fand DONCAN bei mikroskopischer Untersuchung des freigelegten und unverletzten Glaskörpers von seiner Oberfläche aus darin blasse Zellen, welche in der Verwandlung in Schleimstoff begriffen zu sein schienen, wie in *Fig. 78* abgebildet sind.

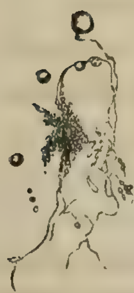


Fig. 78.

b) Perlschnüre kommen in den meisten Augen vor; DONCAN konnte jedoch keine sehen. Ihre Breite beträgt $^1/_{33}$ bis $^1/_{190}$ Mm., ihre Länge 1 bis 4 Mm. Die schmalsten liegen gewöhnlich dichter bei, die breiteren und dunkleren entfernter von der Netzhaut, in $^1/_4$ bis 3 Mm. Abstand. Ihre Bewegungsart ist meist dieselbe wie der vorher beschriebenen Kreise, doch sind sie zuweilen auch befestigt. Einzelne sind isolirt, andere hängen mit anderen Gebilden zusammen. Sie entsprechen Fasern, die mit Körnern besetzt sind (*Fig. 79*), welche durch das Mikroskop im Glaskörper gefunden werden.


Fig. 79.

c) Die zusammenhängenden Gruppen von grösseren und kleineren, theils blassen, theils dunklen Kreisen, welche den mikroskopisch gefundenen Körnerhaufen (*Fig. 80*) entsprechen, sind meist undurchscheinender als die übrigen Formen, weil mehrere Körner in der Richtung der Gesichtsaxe hinter einander liegen. Diese sind es, die am häufigsten beim gewöhnlichen Sehen als *Mouches volantes* wahrgenommen werden. Nicht selten scheinen einige von ihnen in der Nähe der Gesichtslinie einen Gleichgewichtszustand einzunehmen; aber sie kommen doch auch bei Bewegungen des Auges auf gleiche Weise und in gleicher Richtung, mit denselben Bewegungen wie die Perlschnüre, in grösserer Menge zum Vorschein, um das Gesichtsfeld in der Folge wieder zu verlassen.


Fig. 80.

d) Die Falten zeigen sich in Gestalt heller Bänder, von zwei dunkleren, nicht scharf gezeichneten Linien begrenzt. DONCAN unterscheidet davon noch wieder zwei Formen. Einige zeigen sich nämlich entweder ähnlich einer stark gefalteten Faser, oder wie verschiedene kleine Bänder, einander sehr nahe, auf unsichtbare Weise mit einander verbunden, oder als ein unregelmässig aufgerolltes, in den verschiedensten Richtungen gefaltetes Häutchen, das seine Form constant behält, wie das nach einer mikroskopischen Beobachtung in *Fig. 81* dargestellte. Diese bewegen sich wie die Perlschnüre und liegen nur $2^1/_2$ bis 4 Mm. von der Netzhaut entfernt. — Davon unterscheiden sich sehr ausgebreitete Häute, die theils dicht hinter der Linse liegen, theils


Fig. 81.

nur 2 bis 4 Mm. von der Netzhaut entfernt, während zwischen 4 und 10 Mm. Entfernung von der Netzhaut keine getroffen werden. In den ersteren zeigen sich Falten von nicht weniger als $1/_{23}$ Mm. Breite, in den letzteren haben sie selten mehr als $1/_{60}$ Mm. Sie kommen zum Vorschein, wenn die Gesichtslinie seitwärts bewegt wird, aber namentlich auch durch eine kräftige, plötzlich abgebrochene Bewegung von oben nach unten. Scheinbar steigen hierbei die dicht hinter der Linse gelegenen Falten nach oben, während umgekehrt die in der Nähe der Netzhaut gelegenen nach unten sinken, so dass sie sich in der Gesichtslinie an einander vorbeischieben. Meist sieht man nun die gefalteten Häute mehr und mehr undeutlich werden, ohne dass sie doch aus dem Gesichtsfelde sich entfernten, und doch kommen sie durch Wiederholung der Bewegung aufs Neue deutlicher zum Vorschein. Doncan schliesst daraus, dass diese Häute nur scheinbar eine so ausgebreitete Bewegung haben, und dass nicht die Häute sich fortbewegen, sondern nur Faltungen sich fortpflanzen, welche sich bei der plötzlich unterbrochenen Bewegung des Auges an der Peripherie formen und sich bis an das andere Ende der Häute ausstrecken, wobei sie ihre Schärfe verlieren und minder sichtbar werden. Die Ursache der verschiedenen Richtung, worin die Bewegung dieser Häute und die Fortpflanzung der Falten stattfindet, ist darin zu suchen, dass die einen vor, die anderen hinter dem Drehpunkte des Auges liegen. Wenn man die Pupille durch Atropin erweitert, oder den leuchtenden Punkt sehr nahe an das Auge bringt, sodass man ziemlich weit zur Seite der Gesichtslinie sehen kann, so bemerkt man, dass namentlich bei kräftigen, plötzlich unterbrochenen seitlichen Bewegungen des Auges noch mehr Häute dicht hinter der Linse zum Vorschein kommen, die selten bis an die Gesichtslinie reichen, und mit einem unregelmässigen, zuweilen zerfetzten Rande hier endigen.

Die Bewegungsart der frei beweglichen Objecte des Glaskörpers lässt wohl kaum einen Zweifel, dass sie kleine Körper sind, welche in einem vollkommen flüssigen Medium schwimmen und specifisch leichter sind als die Flüssigkeit. Da man sie oft durch das ganze entoptische Gesichtsfeld schwimmen sieht, und sie in meinem Auge wenigstens das Gesichtsfeld ebenso gut von oben nach unten wie von rechts nach links durchschwimmen, dieses aber bei divergirend einfallendem Lichte einen grösseren Theil der Netzhaut umfasst, als die Pupille beträgt, so muss das Bassin, in welchem sie sich bewegen, längs der Netzhaut gemessen, jedenfalls grösser sein als die Pupille. Dagegen scheinen die schwimmenden Körper sich nicht von der Netzhaut entfernen zu können, denn auch bei aufwärts gerichteter Gesichtslinie, wo die Objecte wegen ihrer specifischen Leichtigkeit streben müssen nach der Linsenseite des Glaskörpers hin zu schwimmen, sieht man dieselben Objecte sich längs der Netzhaut hin bewegen, aber nicht von ihr fort. Das Hinderniss mögen wohl die Membranen sein, deren Falten man im entoptischen Gesichtsfelde sieht und welche der Netzhaut parallel zu sein scheinen. Einige solche Körperchen scheinen auch an der Glashaut befestigt zu sein, wie denn Donders mittheilt, dass er in der Gesichtslinie seines linken Auges eines vorfinde, welches dort seinen Gleichgewichtsstand habe, und von dort wohl sich senken (scheinbar steigen), aber nicht wirklich steigen könne, so dass es von

unten her durch eine fadenähnliche Verbindung mit der Glashaut festgehalten zu werden scheint.

Uebrigens lernt man nach einer Reihe entoptischer Beobachtungen die Gebilde des eigenen Auges einzeln kennen, und bemerkt dann, dass immer dieselbe Reihe von Formen wiederkehrt, welche sich nach Donders' Beobachtungen viele Jahre unverändert erhalten. Aus der mikroskopischen Untersuchung des Glaskörpers scheint hervorzugehen, dass diese Gebilde Reste des embryonalen Baues des Glaskörpers sind. Bei Embryonen besteht er aus Zellen, welche nachher meistens in Schleim zerfliessen, während ein Theil von ihren Membranen und Kernen, oder den Fasern, zu denen sie ausgewachsen sind, bestehen bleibt. Welches übrigens der Bau des Glaskörpers bei erwachsenen Menschen sei, ist noch durchaus nicht sicher zu bestimmen.

Wir kommen jetzt zur Wahrnehmung der Netzhautgefässe, für welche aber etwas andere Verfahrungsweisen nothwendig sind, als für die Wahrnehmung der bisher beschriebenen entoptischen Objecte. Das Gemeinsame dieser Methoden besteht darin, dass die Lage oder Breite des Schattens, den die Netzhautgefässe auf die hintere Fläche der Netzhaut werfen, eine ungewöhnliche wird, und dass ausserdem eine stete Bewegung dieses Schattens unterhalten wird. Man kann die Netzhautgefässe nach folgenden drei Hauptmethoden wahrnehmen:

1) Man concentrire starkes Licht, am besten Sonnenlicht, durch eine Sammellinse von kurzer Brennweite auf einen Punkt der äusseren Fläche der Sclerotica möglichst entfernt von der Hornhaut, so dass ein kleines, aber sehr lichtstarkes Bildchen der Lichtquelle auf der Sclerotica entworfen wird. Wenn dabei das Auge auf ein dunkles Gesichtsfeld blickt, wird dieses ihm jetzt rothgelb erleuchtet scheinen und darin ein Netz baumförmig verästelter dunkler Gefässe erscheinen, entsprechend den in *Fig. 82* nach einem Injectionspräparate abgebildeten Netzhautgefässen. Wenn der Brennpunkt auf der Sclerotica hin und her bewegt wird, bewegt sich auch der Gefässbaum hin und her, und zwar bewegen sich beide gleichzeitig nach oben, oder beide gleichzeitig nach unten, oder beide nach rechts oder links. Bei solchen Bewegungen ist der Gefässbaum deutlicher zu sehen, als wenn man längere Zeit den Brennpunkt der Linse auf einer Stelle beharren lässt; ja im letzteren Falle verschwindet er zuletzt ganz. Doch ist bei der jetzt beschriebenen Methode der Beobachtung anhaltende Bewegung weniger nöthig als bei den anderen Methoden. Je kleiner übrigens der helle Fleck auf der Sclerotica ist, desto schärfer sind auch die kleineren Zweige der Gefässverästelung ausgeprägt, so dass man bei richtiger Ausführung des Versuchs das feinste Capillargefässnetz zur Anschauung

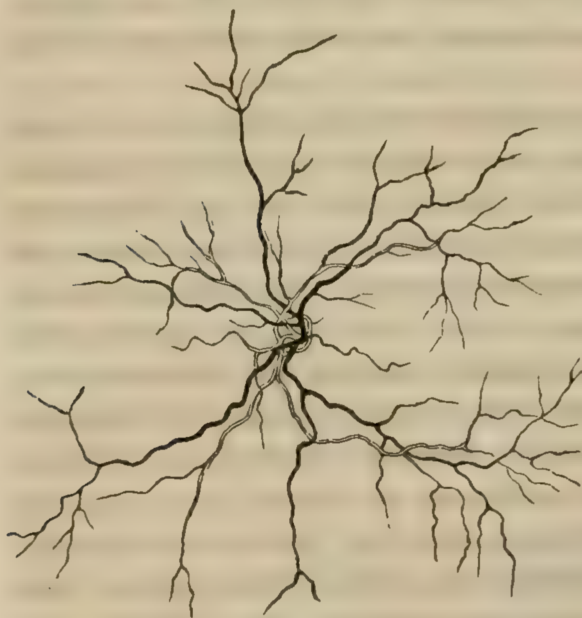


Fig. 82.

bringen kann. In der Mitte des Gesichtsfeldes, dem Fixationspunkte entsprechend, findet sich eine gefässlose Stelle, gegen welche verschiedene grössere Aeste hinlaufen, deren Capillargefässe einen Ring mit langgezogenen Maschen um die genannte Stelle bilden. Die Stelle selbst hat in H. Müller's, sowie in meinen beiden Augen ein eigenthümliches Aussehen, wodurch sie sich von dem übrigen Grunde des Auges unterscheidet. Der letztere ist gleichmässig erleuchtet, mit Ausnahme der dunklen Gefässfigur, die Stelle des directen Sehens hat einen stärkeren Glanz und sieht dabei wie chagrinirtes Leder aus. Zu bemerken ist übrigens noch, dass, wenn man während der Beobachtung dieser Stelle einen äusseren Gegenstand fest fixirt, und nun den Brennpunkt der Linse auf der Sclerotica nach oben bewegt, der Gefässbaum, wie vorher erwähnt ist, sich ebenfalls nach oben bewegt, der chagrinirte Glanz sich dagegen ein wenig in entgegengesetzter Richtung nach unten gegen den Fixationspunkt des Auges verschiebt. Meissner hat diese Stelle ebenfalls bei dieser Beobachtungsmethode heller gesehen, schreibt ihr aber einen dunklen halbmondförmigen Schatten am Rande zu, ähnlich wie er bei der zweiten Beobachtungsmethode sichtbar wird. Einen solchen sehe ich nicht, wenn das Licht durch die Sclerotica einfällt.

Bei diesem Versuche dringt das Licht durch die Sehnen- und Aderhaut in das Auge. Die erstere ist durchscheinend, die letztere im hinteren Theile des Auges nicht so stark pigmentirt, dass sie alles Licht abhalten könnte. Vorn auf den Ciliarfortsätzen ist die Pigmentschicht stärker, daher auch bei unserem Versuche die Erleuchtung der Netzhaut ziemlich schwach ausfällt, wenn man den Brennpunkt auf den vorderen Theil der Sclerotica nahe der Hornhaut fallen lässt. Die erleuchtete Stelle der Augenhäute bildet nun die Lichtquelle für das Innere des Auges; von ihr gehen nach allen Seiten hin gleichmässig Strahlen aus, da das Licht in der nur durchscheinenden Sehnenhaut nicht regelmässig gebrochen, sondern nach allen möglichen Richtungen zerstreut wird.

Während gewöhnlich das Licht nur von der Pupille her auf die Netzhaut fällt, kommt es jetzt von einem weit seitlich gelegenen Punkte und wirft deshalb die Schatten der in den vorderen Schichten der Netzhaut gelegenen Gefässe auf ganz andere Theile der hinteren Netzhautfläche als sonst.

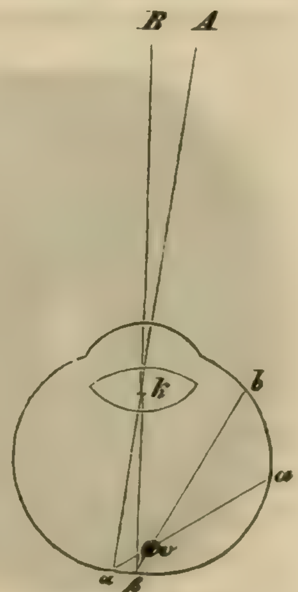


Fig. 83.

Dass der Gefässbaum sich scheinbar in gleichem Sinne wie der Brennpunkt der Linse bewegen muss, ist aus *Fig.* 83 deutlich. Es sei v der Durchschnitt eines Netzhautgefässes, k der Knotenpunkt des Auges. Wenn der Brennpunkt des einfallenden Lichts bei a auf der Sclerotica liegt, fällt der Schatten des Gefässes nach α, das Auge projicirt demgemäss einen dunklen Streifen in der Richtung αA im Gesichtsfelde. Liegt der Brennpunkt in b, so fällt der Schatten nach β, und es wird der dunkle Streifen in das Gesichtsfeld nach B verlegt. Während sich also die Lichtquelle von a nach b bewegt, wird der scheinbare Gefässstamm im Gesichtsfelde von A nach B in gleicher Richtung wandern. Die chagrinirte Fläche um den Visirpunkt herum zeigt die

entgegengesetzte Bewegungsart; sie entsteht also jedenfalls nicht in derselben Weise, wie die Gefässschatten entstehen, doch ist bisher der Bau des gelben Fleckes noch zu wenig bekannt, als dass wir den Grund dieser Erscheinung anzugeben wüssten. Im Gesichtsfelde greift auf der dem Lichte abgekehrten Seite der Gefässbaum etwas über den Rand der chagrinirten Stelle, oben und unten scheint er nur den Rand zu berühren, dem Lichte zugekehrt ist ein Zwischenraum zwischen beiden, gleichviel ob das Licht vom inneren oder äusseren Augenwinkel einfällt. Es ist dies wohl dadurch bedingt, dass die Gefässverzweigungen mehr nach vorn liegen als die Schicht, welche durch Brechung oder Zurückwerfung des Lichts das chagrinirte Aussehen erzeugt, und daher bei schief einfallendem Lichte der Schatten der Gefässfigur auf der Hinterfläche der Netzhaut nicht senkrecht unter den Gefässen liegt. Diejenige Structur, welche das chagrinirte Ansehen hervorruft, scheint demnach ziemlich genau dieselbe Ausdehnung zu haben, wie die gefässlose Stelle der Netzhaut.

2) Die zweite Methode zur Beobachtung der Netzhautgefässe ist folgende: Man blicke auf einen dunklen Hintergrund hin und bewege dabei unterhalb oder seitlich vom Auge ein brennendes Licht hin und her. Man sieht dann bald den dunklen Hintergrund von einem matten weisslichen Scheine überzogen, in welchem sich der dunkle Gefässbaum abzeichnet. Die Figur bleibt nur so lange deutlich, als man das Licht bewegt. Wenn man das Licht nur von rechts nach links bewegt, erscheinen hauptsächlich die von oben nach unten verlaufenden Gefässe, wenn man es von oben nach unten bewegt, die horizontal verlaufenden. Bei den Bewegungen des Lichts bewegt sich gleichzeitig der ganze Gefässbaum, aber nicht in allen seinen Theilen gleichmässig. Meissner vergleicht sehr passend die Art der Bewegung des Gefässbaums hierbei mit dem Ansehen eines vom Wasser entworfenen Spiegelbildes, wenn Wellen darüber fortlaufen. Bei näherer Untersuchung der Erscheinung zeigt sich, dass, wenn abwechselnd das Licht gegen die Gesichtslinie hin und von ihr weg bewegt wird, der Gefässbaum im Gesichtsfelde sich in gleicher Richtung wie das Licht verschiebt. Wenn aber das Licht in Richtung eines Kreisbogens bewegt wird, dessen Mittelpunkt in der Gesichtslinie liegt, verschiebt sich der Gefässbaum in entgegengesetzter Richtung. Wird also z. B. das Licht unter dem Auge gehalten und vertical nach oben und unten bewegt, so bewegt sich auch der Gefässbaum im Gesichtsfelde mit dem Lichte zugleich nach oben und nach unten; wird es horizontal unter dem Auge von rechts nach links bewegt, so geht der Gefässbaum nach rechts, wenn das Licht nach links, und umgekehrt.


Fig. 84.

Die inneren Aeste des Gefässbaums erscheinen nicht in so grosser Feinheit der Zeichnung wie bei den beiden anderen Methoden.

In der Mitte, dem Visirpunkte entsprechend, beschreiben mehrere Beobachter eine helle kreisförmige oder elliptische Scheibe. *Fig. 84* ist die

Abbildung, welche Burow davon gegeben hat. Sie ist an dem der Flamme zugewendeten Rande durch einen dunklen halbmondförmigen Schatten gesäumt, in der Mitte am hellsten. H. Müller sieht diese Scheibe gar nicht, und ich selbst sehe immer nur den halbmondförmigen Schatten, welcher die dem Lichte zugekehrte Seite ihrer Peripherie bildet, während die andere Seite keine entschiedene Begrenzung darbietet. Auch diese centrale Scheibe bewegt sich bei Bewegungen des Lichts. Man überzeugt sich davon, wenn man, während man die Erscheinung wahrnimmt, einen äusseren Punkt fixirt. Bei mir liegt der Fixationspunkt immer an dem dem Lichte zugewendeten Theile des Randes der hellen Scheibe, wenn ich den halbmondförmigen Schatten meines Auges zur Scheibe ergänzt denke.

Die vollständige Theorie dieser Erscheinungen ist von H. Müller gefunden worden, und ist folgende: Die Lichtquelle für die Beleuchtung des inneren Auges ist in diesem Falle das Netzhautbildchen der Lichtflamme, welches, da das Licht weit vom Centrum des Gesichtsfeldes absteht, auf dem Seitentheile der Netzhaut entworfen wird. Da das Licht sich übrigens dem Auge sehr nahe befindet, kann sein Netzhautbild ziemlich gross sein und genügend viel Licht in den Glaskörper hinein zurückwerfen, um eine merkliche Lichtperception in der ganzen Netzhaut anzuregen. Die Art der Beleuchtung ist also ähnlich derjenigen der ersten Methode, nur dadurch unterschieden, dass die Licht aussendende Stelle der Augenwand ihr Licht nicht von aussen durch die Sclerotica, sondern von vorn durch die Pupille empfängt. Da die Bilder auf den Seitentheilen der Netzhaut nicht scharf sind, das Bildchen der Flamme in diesem Falle, um hinreichend Licht zu geben, auch ziemlich ausgedehnt sein muss, so erklärt es sich leicht, dass man die Einzelnheiten der feineren Gefässverzweigungen nicht so gut wahrnimmt wie bei der ersten Methode. Die Art der Bewegung des Gefässbaums erklärt sich vollständig aus H. Müller's Theorie. Es sei in *Fig 85* k der Knotenpunkt des Auges und v ein Netzhautgefäss. Wenn die Lichtquelle in a sich befindet, fällt ihr Netzhautbild nach b, das von b ausgehende Licht wirft den Schatten des Gefässes v nach c, und wenn wir $c\,k$ ziehen und verlängern, ist diese Verlängerung $k\,d$ die Richtung, in welcher der Schatten des Gefässes v im Gesichtsfelde erscheint. Bewegen wir den Lichtpunkt von a nach α, so rückt b nach β, c nach γ, d nach δ; es verschiebt sich also d in gleichem Sinne wie a. Wenn hingegen a sich senkrecht gegen die Ebene der Zeichnung bewegt, ist es umgekehrt. Wenn a vor der genannten Ebene steht, liegt b dahinter, c wieder davor, d dahinter. Wenn also a sich nach vorn (vor die Ebene der Zeichnung) bewegt, bewegt sich d nach hinten, und umgekehrt, ganz wie es den Beobachtungen entspricht.

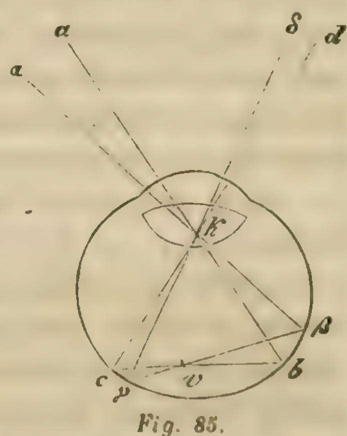


Fig. 85.

Die Erscheinung der hellen Scheibe in der Mitte des Gesichtsfeldes mit dem halbmondförmigen Schatten erklärt H. Müller nicht ohne Wahrscheinlichkeit für den Schatten der Netzhautgrube. Wenn in *Fig. 86* bei c die Netzhaut-

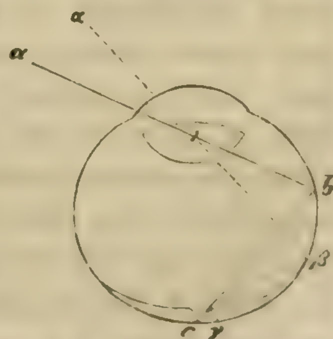


Fig. 86.

grube sich befindet, und in ihrer Tiefe die Stelle des directen Sehens, das Licht bei *a* steht, sein Netzhautbild bei *b*, so wird der Schatten des nach *b* hingewendeten erhabenen Randes der Netzhautgrube gerade auf den Visirpunkt fallen, und der ganze Schatten der Netzhautgrube auf der Netzhaut selbst vom Visirpunkte aus dem Lichte zugewendet, im Gesichtsfelde dem Lichte abgewendet sein, wie dies die Beobachtung lehrt. Wenn man das Licht *a* mehr der Gesichtslinie nähert, und in Folge davon *b* näher nach *c* rückt, bemerke ich in meinem Auge einen hellen Streifen an der Aussenseite des halbmondförmigen Schattens, der wohl von Licht herrührt, welches von hinten, von der Netzhautseite her, auf die Oberfläche der Netzhautgrube gefallen und dort reflectirt ist, wie es in *Fig. 86* durch den punktirten Strahl $\alpha\ \beta\ \gamma$ angedeutet ist. Bei Personen, deren Netzhautgrube weniger steil ansteigende Seiten hat, kann dagegen ein solcher Schatten ganz fehlen.

3) Die dritte Methode zur Beobachtung der Netzhautgefässe besteht darin, dass man durch eine enge Oeffnung nach einem breiten lichten Felde, z. B. dem hellen Himmel, blickt und die Oeffnung vor der Pupille schnell hin und her bewegt. Die Netzhautgefässe erscheinen sehr fein gezeichnet, dunkel auf dem hellen Grunde, und bewegen sich im Gesichtsfelde gleichsinnig mit der Oeffnung. In der Mitte, entsprechend dem Visirpunkte, sieht man die gefässlose Stelle, die mir ein fein granulirtes Ansehen zu haben scheint, und in welcher sich ein runder Schatten bei den Bewegungen der Oeffnung herumbewegt. Bei horizontalen Bewegungen der Oeffnung sieht man nur die verticalen Gefässe, bei verticalen Bewegungen die horizontal verlaufenden. Dieselbe Gefässfigur sieht man auch, wenn man in ein zusammengesetztes Mikroskop hineinblickt, ohne ein Object unterzulegen, so dass man nur den gleichmässig hellen Kreis der Blendung sieht. Wenn man das Auge über dem Mikroskope etwas hin und her bewegt, erscheinen in der Blendung des Mikroskops die Gefässe der Netzhaut sehr fein und scharf gezeichnet, und zwar besonders deutlich immer die Gefässe, welche senkrecht gegen die Richtung der Bewegung verlaufen, während diejenigen verschwinden, welche der Richtung der Bewegung parallel verlaufen.

Nach den beiden ersten Methoden fiel das Licht aus einer ungewöhnlichen Richtung her auf die Netzhaut, und es fiel deshalb auch der Schatten der Netzhautgefässe auf Theile der Netzhaut, welche bei dem gewöhnlichen Sehen von diesem Schatten nicht getroffen werden, und von denen die Beschattung daher als ein ungewöhnlicher Zustand leicht empfunden wird. Bei der beschriebenen dritten Methode dagegen fällt das Licht auf dem gewöhnlichen Wege, nämlich durch die Pupille, in das Auge. Ist die ganze Pupille frei und das Auge nach dem hellen Himmel gewendet, so gehen von jedem Punkte der Pupillarebene nach jeder Richtung in den Hintergrund des Auges hinein Lichtstrahlen aus, ganz so als wäre die Pupille selbst die leuchtende Fläche. Unter dem Einflusse dieser Beleuchtung müssen die Netzhautgefässe einen breiten verwaschenen Schatten auf die hinter ihnen liegenden Netzhautpartien werfen, wobei der Kernschatten etwa nur vier bis fünf mal so lang sein wird, als der Durchmesser des Gefässes. Da nach E. H. Weber der dickste Ast der *Vena centralis* 0,017 Par. Linien (0,038 Mm.) im Durchmesser hat, und die Netzhaut nach Kölliker im Hintergrunde des Auges

0,22 Mm. dick ist, lässt sich annehmen, dass der Kernschatten der Gefässe nicht bis zur hinteren Fläche der Netzhaut reichen wird. Wenn wir aber eine enge Oeffnung vor die Pupille bringen, wird der Schatten der Gefässes nothwendig schmaler, schärfer begrenzt, der Kernschatten länger, so dass Theile der Netzhaut, die sonst im Halbschatten lagen, theils in den Kernschatten kommen, theils mit den unbeschatteten Theilen gleich stark erleuchtet werden.

Dass wir beim gewöhnlichen Sehen die Gefässschatten nicht wahrnehmen, erklärt sich wohl daraus, dass die Empfindlichkeit der beschatteten Stellen der Netzhaut grösser, ihre Reizbarkeit weniger erschöpft ist als die der übrigen Theile der Netzhaut. Sobald wir aber den Ort des Schattens oder seine Ausbreitung verändern, wird derselbe wahrnehmbar, weil die schwache Beleuchtung nun auf ermüdete, weniger reizbare Netzhautelemente fällt. Der reizbarere, früher beschattete Theil der Netzhautelemente dagegen wird nun zum Theil von vollem Lichte getroffen, und empfindet dies stärker. Daher erklärt sich, dass zuweilen, namentlich im Anfange der Versuche, der Gefässbaum für Augenblicke auch wohl hell auf dunklerem Grunde erscheint, und überhaupt bei manchen Personen der helle Theil der Erscheinung die Aufmerksamkeit mehr auf sich lenken kann als der dunkle. Sobald der Schatten der Gefässe indessen bei unseren Versuchen seine neue Stelle dauernd behauptet, werden die neu beschatteten Stellen allmälig reizbarer, die früher beschatteten scheinen dagegen ihre erhöhte Reizbarkeit schnell zu verlieren, und die Erscheinung verschwindet wieder. Um sie dauernd zu sehen, ist es also nöthig, den Ort des Schattens stets wechseln zu lassen, und bei geradlinigen Bewegungen der Lichtquelle bleiben nur die Gefässe sichtbar, deren Schatten den Platz wechselt. Auf diese Veränderungen der Reizbarkeit kommen wir in §. 25 unten noch näher zurück.

Um zu entscheiden, ob die entoptisch gesehenen Objecte vor oder hinter der Pupille oder etwa nahe der Netzhaut liegen, dazu ist die Beachtung der Parallaxe nach Listing's Vorschlag ausreichend. Es sei *a Fig. 87* das von den Augenmedien entworfene Bild des leuchtenden Punktes, *c* der Punkt des directen Sehens auf der Netzhaut, *fe* die Ebene der Pupille oder vielmehr deren von der Linse entworfenes Bild, welches indessen nur wenig von seinem Objecte abweicht. Endlich sei *d* ein dunkles Object hinter der Pupille. Wenn die Linie *ac* die Pupille in *g* schneidet, so fällt der Schatten des Punktes *g* auf den Punkt des directen Sehens *c*, also *g* entspricht dem direct gesehenen Punkte des entoptischen Bildes der Pupille. Ziehen wir die gerade Linie *ad*, und verlängern sie, bis sie die Netzhaut in *b* schneidet, so ist *b* der Ort des Schattens von *d*. Nennen wir den Durchschnittspunkt der Linie *ad* mit der Pupillarebene *h*, so fällt die Projection des Punktes *h* der Pupille gleichzeitig auf *b*; *p* und *h* decken sich im entoptischen Gesichtsfelde. Wenn in der Linie *ab* auch noch vor der Pupille ein Object *i* liegt, so deckt sich dieses ebenfalls mit *h* im entoptischen Gesichtsfelde.

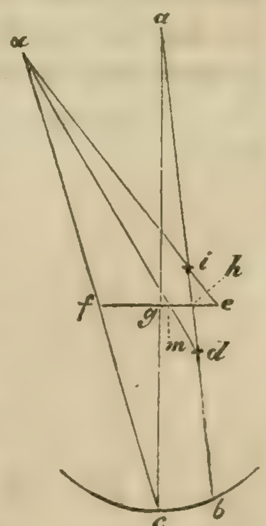


Fig. 87.

Wenn nun aber das Auge oder der leuchtende Punkt so bewegt wird, dass ein anderer Punkt der Pupille, etwa *f*, entoptisch direct gesehen wird, der leuchtende Punkt etwa nach α in die Verlängerung der Linie *cf* rückt, so verändert sich auch die Lage des Schattens von *d* und *i* gegen den der Pupille. Ziehen wir αd und αi. Ersteres schneide die Ebene der Pupille in *m*, letzteres verlängert in *e*, so sind *m* und *e* die Punkte der Pupille, deren entoptische Bilder sich mit denen der Objecte *d* und *i*

jetzt decken. Während also der Visirpunkt in dem entoptischen Bilde von *g* nach *f* gerückt ist, hat das Bild des hinter der Pupille gelegenen Objects *d* eine Bewegung in gleichem Sinne von *h* nach *m*, das des vor der Pupille gelegenen Objects in entgegengesetztem Sinne von *h* nach *e* ausgeführt. Nach der Bezeichnungsweise von Listing hat also *d* eine positive Parallaxe, und *i* eine negative. Es ist bei geringer Uebung immer leicht zu entscheiden, ob die entoptisch gesehenen Objecte sich im Verhältniss zu der kreisförmigen Begrenzung des Gesichtsfeldes in gleichem oder entgegengesetztem Sinne wie der Visirpunkt verschieben, und danach entscheidet man leicht, ob sie vor oder hinter der Pupille liegen.

Um die Entfernung der im Glaskörper schwebenden Objecte genauer messen zu können, hat D. Brewster zuerst eine Methode eingeschlagen, bei welcher er zwei Bündel homocentrischer Strahlen in das Auge dringen liess, und dadurch zwei Schatten eines jeden Objects erzeugte. Aus der Entfernung der Schatten von einander kann dann die Entfernung des Objects von der Netzhaut gefunden werden. Brewster sah zu dem Ende durch eine vor dem Auge stehende Linse nach zwei neben einander gestellten Flammen hin. Donders hat diese Methode geändert, indem er vor das Auge ein Metallplättchen mit zwei kleinen, $1\frac{1}{2}$ Mm. von einander entfernten Oeffnungen bringt. Durch diese sieht er nach einem weissen, stark erleuchteten Papiere hin, auf welchem die entoptischen Erscheinungen projicirt erscheinen. Er misst nun den Abstand der Mittelpunkte der beiden sich gegenseitig bedeckenden kreisförmigen Bilder der Pupille, welcher einfach dadurch gefunden wird, dass man den Durchmesser des unbedeckten Theiles dieser Kreise misst. Ferner misst er den Abstand der Doppelbilder des betreffenden entoptischen Objects. Der letztere verhält sich zum Abstande der beiden Kreise wie der Abstand des Objects von der Netzhaut, welcher gefunden werden soll, zum scheinbaren Abstande der Pupille von der Netzhaut (18 Mm.). So kann der Abstand der Objecte von der Netzhaut leicht berechnet werden.

Doncan hat die Methode von Donders insofern geändert, dass er seine Messungen nach dem Principe der mikroskopischen Messung *à double vue* ausführt. Das eine Auge blickte durch eine oder zwei feine Oeffnungen nach einem kleinen Hohlspiegel, der das Licht des Himmels reflectirte, das andere auf eine in der Entfernung des deutlichen Sehens gelegene Tafel, und der Beobachter misst mit dem Cirkel auf dieser Tafel die Grösse der entoptischen Objecte und den Abstand ihrer Doppelbilder, sowie den Abstand entsprechender Punkte am Rande der Iris. Um aus der scheinbaren Grösse der entoptischen Objecte ihre wahre Grösse zu berechnen, muss man noch den Abstand der Oeffnung, durch welche man sieht, von der Hornhaut kennen. Am besten ist es, diese Oeffnung in den vorderen Brennpunkt des Auges (12 Mm. vor der Hornhaut) anzubringen, dann sind die Schatten der entoptischen Objecte so gross wie die Objecte selbst. Die mit dem Cirkel gemessene scheinbare Grösse dieser Objecte im Gesichtsfelde verhält sich aber zur wahren Grösse des Schattens auf der Netzhaut wie die Entfernung des messenden Cirkels vom Auge zur kleineren Hauptbrennweite des Auges (15 Mm.).

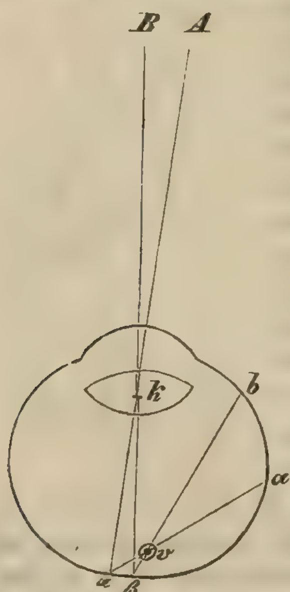


Fig. 83.

Um das Plättchen mit der Oeffnung wenigstens nahehin in die vordere Brennebene des Auges zu bringen, befestigt man es am Ende eines kurzen Röhrchens von passender Länge.

Die scheinbare Grösse der Bewegung des Gefässbaums im Gesichtsfelde bei der ersten eben beschriebenen Methode, ihn sichtbar zu machen, hat H. Müller gemessen, während gleichzeitig die Grösse der Verschiebung des leuchtenden Brennpunktes auf der Sclerotica mit dem Cirkel gemessen wurde. Es kann daraus, wenigstens annähernd, durch Construction oder Rechnung die Entfernung der Schatten werfenden Gefässe von der den Schatten wahrnehmenden Schicht der Netzhaut bestimmt werden. Man zeichne, wie in *Fig. 83*, den Querschnitt des Auges in natürlicher Grösse. Der Brennpunkt auf der Sclerotica sei zwischen den Punkten *a* und *b* hin und her bewegt. Es sei α der Schatten eines in der Nähe des gelben Flecks gelegenen Gefässes *v*, dessen scheinbare Bewegung man gemessen hat, für die

Lage des Lichtpunktes in a, so muss dies Gefäss in der geraden Linie $a\alpha$ liegen. Es sei $\alpha\beta$ die aus der scheinbaren Verschiebung des Gefässes im Gesichtsfelde berechnete wahre Verschiebung auf der Netzhaut, also β der Ort des Gefässschattens für den Fall, wo sich der Brennpunkt in b befindet. Man ziehe die gerade Linie $b\beta$. Der Punkt v, wo $b\beta$ und $a\alpha$ sich schneiden, muss dann der Ort des Gefässes sein, dessen Entfernung von der Netzhaut durch Messung oder Rechnung gefunden werden kann. H. Müller erhielt auf die Weise in mehreren Versuchen für die Entfernung der Gefässe von der empfindenden Schicht 0,17; 0,19 bis 0,21; 0,22; 0,25 bis 0,29; 0,28 bis 0,32 Mm. Bei drei anderen Beobachtern 0,19; 0,26; 0,36 Mm. Da nach den anatomischen Messungen desselben Beobachters die Entfernung der Gefässe von den Stäben und Zapfen in der Gegend des gelben Flecks zwischen 0,2 und 0,3 Mm. beträgt, so wird es daraus wahrscheinlich, dass die Zapfen die den Schatten empfindenden Gebilde seien, worauf auch andere Verhältnisse hindeuten, welche ich in §. 18 auseinandersetzen werde.

Dechales [1], ein Jesuit des 17. Jahrhunderts, stellte zuerst eine Ansicht über die Entstehung der fliegenden Mücken auf, und zwar die richtige, dass es Schatten seien von Körperchen, die in der Nähe der Netzhaut schwimmen. Pitcairn [2] verlegte sie dagegen auf die Netzhaut selbst, und Morgagni [3] in alle Augenmedien, obgleich die weiter nach vorn liegenden ohne die Anwendung schmaler Lichtquellen nicht wohl gesehen sein können. Ebenso irrt auch de la Hire [4], wenn er die festen Mücken ausschliesslich auf die Netzhaut verlegt, die beweglichen in die wässrige Feuchtigkeit. Le Cat [5] beschreibt einen Versuch, der dem Principe nach die Methode der entoptischen Untersuchung vollständig enthält, indem er das umgekehrte Schattenbild einer dicht vor das Auge gehaltenen Nadel im Zerstreuungskreise eines kleinen Lichtpunktes wahrgenommen hat. Auch Aepinus [6] hat etwa zu derselben Zeit den Schatten der Iris, die Erweiterung und Verengerung der Pupille entoptisch wahrgenommen und richtig verstanden. Aber erst seit 1760 [7] hat man angefangen, kleine Oeffnungen und starke Linsen anzuwenden, um die fliegenden Mücken deutlicher zu sehen, welches Verfahren übrigens auch dem Dechales nicht ganz unbekannt gewesen war.

Eine strengere Theorie der Erscheinungen, die Methoden, den Ort der Körperchen im Auge zu beurtheilen, wurde erst viel später durch Listing [8] und Brewster [9] festgestellt, denen später Donders [10] folgte. Des Letzteren Schüler Doncan [11] wies dann die Uebereinstimmung der entoptisch gesehenen Gegenstände mit mikroskopischen Structuren des Glaskörpers nach; dasselbe versuchte James Jago [12]. Beschreibungen der verschiedenen Formen entoptischer Objecte gaben ausser den eben Genannten auch Steifensand [13], Mackenzie [14], Appia [15].

Die subjective Erscheinung der Centralgefässe hat Purkinje [16] zuerst entdeckt und sie nach den drei oben beschriebenen Methoden sichtbar gemacht. Auch bei Erregung des Auges durch Druck und Blutandrang hat er sie wahrgenommen. Gudden [17] machte auf die für die Theorie der Erscheinung wichtige Bedeutung der Bewegung des Schattens aufmerksam. Die Theorie der Erscheinung bei der Anwendung homocentrischen Lichts von der Pupille aus oder eines Brennpunktes auf der Sclerotica schien keine Schwierigkeit zu haben. Wohl aber machte Meissner [18] auf die abweichenden Verhältnisse aufmerksam, welche bei der Bewegung

---

1 Cursus seu mundus mathematicus. Lugduni 1690. T. III. p. 402.
2 Pitcairnii opera. Lugd. Bat. p. 203. 206.
3 Adversaria anatomica VI. Anim. LXXV. p. 94. Lugd. Bat. 1722.
4 *Accidens de la vue.* p. 358.
5 *Traité des sens.* Rouen 1740. p. 298.
6 Novi Comment. Petropol. Vol. VII. p. 303.
7 *Histoire de l'Acad. d. sciences.* 1760. p. 57. Paris 1766.
8 Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen 1845.
9 *Transactions of the Roy. Soc. of Edinb,* XV. 377.
10 Nederl. Lancet. 1846—47. 2e Serie. D. II. bl. 345. 432. 537.
11 De corporis vitrei structura. Diss. Utrecht 1854; Onderzoekingen ged. in het. Physiol. Laborat. d. Utrecht'sche Hoogeschool. Jaar VI. p. 171.
12 *Proceed. Roy. Soc.* 18. Jan. 1855.
13 Poggendorff's Ann. LV. p. 134; v. Ammon's Monatsschrift f. Med. I. 203.
14 *Edinburgh Medical and Surgical Journal.* July 1845.
15 *De l'oeil vu par lui même.* Genève 1853.
16 Beiträge zur Kenntniss des Sehens. 1819. S. 89. Neue Beiträge. 1825. S. 115. 117.
17 J. Müller's Archiv für Anat. u. Physiol. 1849. S. 522.
18 Beiträge zur Physiologie des Sehorgans. 1854.

eines Lichts unterhalb des Auges eintreten, und leitete daraus Bedenken gegen die bisherige Erklärungsweise überhaupt ab. Diese wurden von H. MÜLLER [1] beseitigt, welcher die oben hingestellte Theorie dieser Art des Versuchs fand.

Schon PURKINJE erwähnt, dass in der Mitte des Gesichtsfeldes ein heller Fleck erschiene, der einer Grube ähnlich sehe; BUROW [2] beschrieb die entoptische Erscheinung des gelben Flecks genauer, deutete sie aber als die Erscheinung einer Hervorragung, nicht eines Grübchens, vermöge der unrichtigen älteren Theorie des Versuchs, die durch H. MÜLLER verbessert wurde.

1690. DECHALES Cursus seu mundus mathematicus. Lugduni. T. III. p. 402.
1694. DE LA HIRE *Accidens de la vue* in *Mém. de l'Acad. d. sc.* p. 358.
PITCAIRNII opera. Lugd. Bat. p. 203. 206.
1722. MORGAGNI Adversaria anatomica VI. Anim. LXXV. p. 94. Lugd. Bat.
1740. LE CAT *Traité de sens.* Rouen. p. 298.
AEPINUS Novi Comment. Petrop. VII. p. 303.
1760. *Histoire de l'Acad. d. sc. pour l'an.* 1760. p. 57.
1819. PURKINJE Beiträge zur Kenntniss des Sehens. S. 89*.
1825. Derselbe. Neue Beiträge. S. 115. 117*.
1842. STEIFENSAND in POGGENDORFF's Ann. LV. p. 134*; v. AMMON's Monatsschrift für Medicin. I. 203.
1845. *LISTING Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen.*
BREWSTER in *Transactions of the Roy. Soc. of Edinb.* XV. 377.
MACKENZIE *Edinb. Medical. and Surgical Journal.* July 1845.
1846. DONDERS in Nederlandsch Lancet. 1846—47. 2e Serie. D. II. bl. 345. 432. 537.
1848. BREWSTER in *Phil. Magaz.* XXXII. 1; *Arch. d. sc. phys. et natur. de Genève.* VIII. 299.
1849. GUDDEN in J. MÜLLER's Archiv. 1849. S. 522*.
1853. APPIA *de l'oeil vu par lui même.* Genève.
1854. *A. DONCAN de corporis vitrei structura. Dissert. Trajecti ad Rhenum; Onderzoekingen ged. in het Physiol. Loborat. d. Utrecht'sche Hoogeschool. Jaar VI. p. 171.
BUROW in J. MÜLLER's Archiv. 1854. S. 166.
1855. JAMES JAGO in *Proceedings of the Roy. Soc.* 18. Jan. 1855.

§. 16. Das Augenleuchten und der Augenspiegel.

Von dem Lichte, welches auf die Netzhaut gefallen ist, wird ein Theil absorbirt, namentlich durch das schwarze Pigment der Aderhaut, ein anderer Theil wird diffus reflectirt, und kehrt durch die Pupille nach aussen zurück.

Unter gewöhnlichen Verhältnissen nehmen wir nichts von dem Lichte wahr, welches aus der Pupille eines anderen Auges zurückkehrt, diese erscheint uns vielmehr ganz dunkelschwarz. Der Grund hiervon ist hauptsächlich in den eigenthümlichen Brechungsverhältnissen des Auges zu suchen, zum Theil auch darin, dass von den meisten Stellen des Augenhintergrundes wegen des schwarzen Pigments verhältnissmässig wenig Licht zurückgeworfen wird.

Bei allen Systemen brechender Flächen, welche ein genaues Bild eines leuchtenden Punktes entwerfen, können die Lichtstrahlen genau auf denselben Wegen, auf denen sie von dem leuchtenden Punkte zu dessen Bilde gegangen sind, auch rückwärts von dem Bilde zu dem leuchtenden Punkte zurückgehen. Oder wenn man den leuchtenden Punkt an den Ort des Bildes bringt, wird nun das Bild an dem früheren Orte des leuchtenden Punktes entworfen.

Daraus folgt: Wenn das menschliche Auge genau für einen leuchtenden Körper accommodirt ist, und von diesem ein genaues Bild auf seiner Netzhaut entwirft, und wir betrachten nun die erleuchtete Stelle der Netzhaut als ein

---

[1] Verhandl. d. med.-physik. Ges. zu Würzburg. IV. 100. V. Lief. 3.
[2] J. MÜLLER's Archiv. 1854. S. 166.

zweites leuchtendes Object, so wird deren von den Augenmedien entworfenes Bild genau mit dem ursprünglich leuchtenden Körper zusammenfallen, d. h. alles Licht, welches von der Netzhaut aus dem Auge zurückkehrt, wird ausserhalb des Auges direct zu dem leuchtenden Körper zurückgehen, und nicht neben ihm vorbei. Das Auge des Beobachters würde sich, um etwas von diesem Lichte aufzufangen, zwischen den leuchtenden Körper und das beleuchtete Auge einschieben müssen, was ohne weitere Hülfsmittel natürlich nicht angeht, ohne dem beleuchteten Auge das Licht abzuschneiden.

Ebenso wenig kann der Beobachter Licht aus dem Auge eines Anderen zurückkehren sehen, wenn dies letztere für die Pupille des Beobachters genau accommodirt ist. Unter diesen Umständen wird nämlich ein genaues dunkles Bild der Pupille des Beobachters auf der Netzhaut des beobachteten Auges entworfen werden. Rückwärts werden die Augenmedien ein Bild dieser dunklen Stelle der Netzhaut gerade auf die Pupille des Beobachters werfen, und somit wird dieser gerade nur den Wiederschein seiner eigenen schwarzen Pupille in der fremden sehen.

Daher kommt es, dass man unter gewöhnlichen Umständen auch die stärker Licht reflectirenden Theile im Hintergrunde eines fremden Auges nicht sieht, wie z. B. die weisse Eintrittsstelle des Sehnerven, die Gefässe. Auch bei Albinos, Personen, denen das Pigment der Chorioidea fehlt, erscheint die Pupille schwarz, sobald man durch einen dunklen, vor ihr Auge gehaltenen Schirm, der nur eine Oeffnung von der Grösse der Pupille zum Durchsehen hat, verhindert, dass Licht durch ihre Sclerotica in das Innere des Auges dringt [1]. Letzteres ist es, welches das gewöhnliche rothe Ansehen der albinotischen Pupille bewirkt. Ebenso erscheint das Objectglas einer *Camera obscura* von vorn gesehen schwarz, wenn man von ihr das Bild eines einzelnen Lichts in einem dunklen Zimmer entwerfen lässt; selbst dann, wenn man als Schirm zum Auffangen des Bildes ein weisses Blatt Papier angebracht hat.

Ist dagegen das beleuchtete Auge weder für den leuchtenden Gegenstand, noch für die Pupille des Beobachters genau accommodirt, so ist es möglich, dass der Beobachter einiges von dem aus der Pupille zurückkehrenden Lichte wahrnehme, die Pupille erscheint ihm dann leuchtend.

Es ist leicht einzusehen, dass der Beobachter von allen denjenigen Punkten der Netzhaut des beobachteten Auges Licht empfangen kann, auf welche das Zerstreuungsbild seiner eigenen Pupille fällt. Supponiren wir einen Augenblick statt der Pupille des Beobachters eine leuchtende Scheibe, deren Zerstreuungsbild in dem beobachteten Auge genau mit dem Zerstreuungsbilde jener Pupille zusammentreffen würde, so gehen Lichtstrahlen von einem oder mehreren Punkten dieser leuchtenden Scheibe nach jedem Punkte ihres Zerstreuungsbildes hin, es können also auch rückwärts Lichtstrahlen von jedem Punkte der Netzhaut, der dem Zerstreuungskreise angehört, nach einem oder mehreren Punkten der leuchtenden Scheibe, d. h. an den Ort der Pupille des Beobachters gelangen. Der Beobachter

---

[1] F. C. Donders in Onderzoekingen gedaan in het Physiologisch Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool Jaar VI. p. 153. — van Trigt in Nederlandsch Lancet. 3e Ser. D. II bl. 419.

wird also das beobachtete Auge leuchten sehen, so oft in dem beobachteten Auge das Zerstreuungsbild seiner eigenen Pupille theilweise zusammenfällt mit dem Zerstreuungsbilde eines leuchtenden Gegenstandes.

Blickt daher der Beobachter dicht am Rande eines Lichts vorbei, dessen Strahlen er durch einen dunklen Schirm von seinem eigenen Auge abhält, um nicht geblendet zu werden, nach dem Auge eines Anderen, und ist dieses Auge für eine nähere oder viel weitere Entfernung accommodirt, so erscheint ihm die Pupille roth leuchtend. Diese Anordnung des Versuchs ist schematisch in *Fig. 88* dargestellt. *B* ist das Auge des Beobachters, *S* der Schirm, welcher es vor den directen Lichtstrahlen schützt, *A* der Grundriss einer Lampenflamme, *C* das beobachtete Auge, *B C* die Gesichtslinie des Beobachters, *C d* die des beobachteten Auges, welche beliebig gerichtet sein kann.

Fig. 88.

Der Versuch gelingt auch meist, ohne dass man die Accommodation des beobachteten Auges berücksichtigt, wenn entweder der Beobachter weit entfernt ist, weil die meisten menschlichen Augen nicht für grössere Entfernungen sich accommodiren können, oder wenn der Beobachtete, wie in *Fig. 88*, seitwärts sieht, weil dann das Bild des Lichts und der Pupille des Beobachters auf den Seitentheilen der Netzhaut entworfen werden, wo überhaupt die Bilder nicht scharf sind. Am hellsten ist das Leuchten, wenn das einfallende Licht auf die Eintrittsstelle des Sehnerven trifft, weil dessen weisse Substanz das Licht stark reflectirt und wegen ihrer durchscheinenden Beschaffenheit keine hinreichend bestimmte Grenzfläche darbietet, auf der sich das Bild scharf projiciren könnte.

Zu bemerken ist hierbei, dass bei hinreichend starker Beleuchtung auch Licht genug durch die Aderhaut zur Sclerotica dringt, und hier diffus reflectirt wieder zurückkehrt, um wahrgenommen zu werden. Dies Licht verhält sich wie das der Zerstreuungskreise. Daher kann bei starker Beleuchtung auch bei genauer Accommodation des beobachteten Auges für die Pupille des Beobachters ein schwacher Grad von Leuchten stattfinden, namentlich bei schwach pigmentirten Augen, der sich in der angegebenen Weise erklärt.

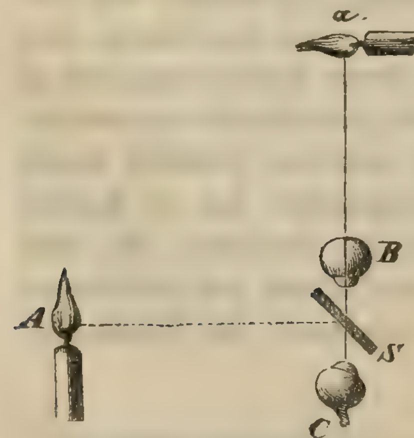


Fig. 89.

Noch besser kann das Augenleuchten beobachtet werden, wenn man nicht direct das Licht der Flamme in das Auge fallen lässt, sondern von einem Spiegel reflectirt, und der Beobachter durch diesen Spiegel hindurchsieht. *A* in *Fig. 89* sei das Licht, *S* der Spiegel, welcher aus einer unbelegten Glasplatte bestehen kann. Diese wirft das auffallende Licht so zurück, als käme es von einem Spiegelbilde α der Flamme. *C* sei das beobachtete Auge, auf dessen Hintergrunde ein kleines Netzhautbildchen des Lichts entworfen wird. Das von der Netzhaut zurückkehrende Licht geht nun, wenn es das Auge verlassen

hat, zunächst in der Richtung des Spiegelbildes α zurück, trifft wieder auf die spiegelnde Platte, wo ein Theil nach dem wirklichen Lichte hin zurückgeworfen wird, während ein anderer durch die Platte geht und seinen Weg nach dem Orte des Spiegelbildes hin fortsetzt. Hier kann es nun von dem Auge des Beobachters B aufgefasst werden. Dieser sieht bei der beschriebenen Anordnung das beobachtete Auge leuchten.

Statt der unbelegten Glasplatte kann auch ein belegter Glasspiegel oder Metallspiegel gebraucht werden, mit einer engen Oeffnung, durch welche der Beobachter sieht.

Wenn der Beobachter unter diesen Umständen nun auch den Hintergrund des beobachteten Auges erleuchtet sieht, so kann er doch in der Regel nichts im Hintergrunde dieses Auges erkennen, weil er sein Auge für das Bild, welches die Augenmedien vom Hintergrunde des Auges entwerfen, nicht accommodiren kann. Zu dem Ende müssen noch passende Glaslinsen hinzugenommen werden. Die Zusammenstellung eines Beleuchtungsapparates mit solchen Glaslinsen giebt ein Instrument, Augenspiegel, mittels dessen man die Bilder auf der Netzhaut und die Theile der Netzhaut eines fremden Auges deutlich sehen und untersuchen kann.

Brücke hat auf einen eigenthümlichen Nutzen aufmerksam gemacht, den die Schicht der stabförmigen Körperchen bei der Zurückwerfung des Lichts an der Netzhaut haben muss. Diese Körperchen sind kleine Cylinder, 0,030 Mm. lang, 0,0018 Mm. dick, von einer stark lichtbrechenden Substanz gebildet, welche palissadenartig dicht neben einander gedrängt die der Aderhaut zugekehrte letzte Schicht der Netzhaut bilden. Die Axe derer, welche im Hintergrunde des Auges die Netzhaut bedecken, ist gegen die Pupille hin gerichtet, und alles einfallende Licht tritt deshalb in diese Körperchen nahehin ihrer Axe parallel ein. Da nun Licht, welches innerhalb eines dichteren Mittels fortschreitend unter einem sehr grossen Einfallswinkel auf die Grenze eines weniger lichtbrechenden Mediums trifft, total reflectirt wird, so können wir schliessen, dass das Licht, welches in ein stabförmiges Körperchen einmal eingetreten ist, dieses meist nicht wieder verlässt, sondern, wenn es irgendwo auf die cylindrische Begrenzungsfläche des Körperchens treffen sollte, hier grösstentheils nach innen reflectirt wird. Wenn wir die Brechkraft der stabförmigen Körperchen beispielsweise gleich der des Oels (1,47), die ihrer Zwischensubstanz gleich der des Wassers setzen (1,33), so werden Strahlen, die unter einem Winkel kleiner als 25^0 gegen ihre Fläche fallen, total reflectirt, während die von der Pupille etwa nur unter einem Winkel von 8^0 auffallen. Ist das Licht endlich an dem äusseren Ende des Körperchens angekommen, und wird hier ein Theil von der Aderhaut diffus zurückgeworfen, so wird dieser wieder hauptsächlich durch dasselbe Körperchen zurückkehren müssen. Was von dem Lichte dann unter einem grösseren Winkel gegen die Axe des Körperchens verläuft, wird allerdings das Körperchen auch verlassen können, aber nur nach oft wiederholten Reflexionen an den Grenzen der nächsten Körperchen bis in den Glaskörper dringen können. Solches Licht dagegen, welches nahe parallel der Axe der Körperchen zurückgeht, wird nur eine oder wenige totale Reflexionen erleiden, daher wenig geschwächt sein, wenn es das Körperchen verlässt, dann aber auch die Richtung nach der Pupille haben und durch diese austreten. Diese Function der Körperchen scheint namentlich bei denjenigen Thieren, welche statt der Schicht schwarzer Pigmentzellen auf der Aderhaut eine stark reflectirende Fläche (Tapetum) haben, von Wichtigkeit zu sein. Einmal wird

dadurch bewirkt, dass das Licht die empfindenden Netzhautelemente, welche es beim Einfallen getroffen hatte, bei seiner Rückkehr noch einmal trifft und erregt. Zweitens kann es rückkehrend nur dieselben oder höchstens theilweise die nächsten Netzhautelemente treffen, und sich nur zu einem kleinen Theile im Auge diffus zerstreuen, was die Genauigkeit des Sehens erheblich beeinträchtigen würde. Dass solches diffus zerstreutes Licht bei hinreichend hellen Netzhautbildern im Gesichtsfelde merkbar werden kann, zeigt die im vorigen Paragraphen beschriebene Beobachtungsweise der Aderfigur mittels eines unter dem Auge hin und her bewegten Lichts.

Ich lasse nun hier eine Reihe allgemeiner Sätze zur Begründung der mathematischen Theorie des Augenleuchtens und der Augenspiegel folgen, durch deren Aufstellung die Betrachtung der einzelnen Fälle später ausserordentlich vereinfacht wird.

Satz I.

Wenn zwei Lichtstrahlen in entgegengesetzter Richtung durch beliebig viele einfach brechende Mittel gehen, und in einem dieser Medien in eine gerade Linie zusammenfallen, so fallen sie in allen zusammen.

Es sei AB *Fig. 90* der Theil der beiden Strahlen, von dem wir wissen, dass er beiden gemeinschaftlich angehöre. Der erste Strahl sei von E längs der Linie EB gekommen, in B gebrochen und nach A gegangen. Der zweite Strahl kommt von A längs der Linie AB nach B, wird hier gebrochen, und gehe nach $E_{\prime}$. Zunächst ist zu beweisen, dass $E_{\prime}B$ mit EB zusammenfällt. DBC sei das Einfallsloth, m das Brechungsverhältniss des Mittels, in welchem E und $E_{\prime}$, der Winkel $EBD = \alpha$ und der Winkel $E_{\prime}BD = \alpha_{\prime}$ liegen; n dagegen das Brechungsverhältniss des Mittels, in welchem A und der Winkel $ABC = \beta$ liegt. Für den ersten Strahl muss nach dem Brechungsgesetz AB in der durch DB und EA gelegten Ebene liegen, und ferner sein

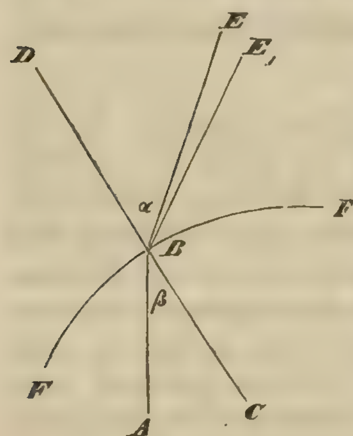


Fig. 90.

$$m \sin \alpha = n \sin \beta.$$

Ebenso muss für den zweiten Strahl $E_{\prime}B$ in der durch DB und AB gelegten Ebene liegen, also in derselben, in welcher auch EB liegt, und es muss sein

$$m \sin \alpha_{\prime} = n \sin \beta.$$

Daraus folgt

$$\sin \alpha = \sin \alpha_{\prime} \text{ oder}$$

$$\alpha = \alpha_{\prime},$$

da beide Winkel nur im ersten Quadranten liegen können.

Daraus folgt, dass $E_{\prime}B$ mit EB zusammenfällt. Somit congruiren die beiden Strahlen auch in dem Mittel, in welchem E liegt, soweit dieses reicht.

Bei der nächsten brechenden Fläche lässt sich ihre Congruenz dann wieder für das dritte Medium folgern u. s. w.

Zusätze. 1) Auch sieht man leicht ein, dass bei Reflexionen an spiegelnden Flächen die Congruenz nicht gestört wird.

2) Für das Auge folgt, dass ein Strahl, der auf seinem Wege von der Netzhaut zur Linse mit einem anderen zusammenfällt, der von einem leuchtenden Punkte in das Auge und auf die Netzhaut fällt, auch ausserhalb des Auges mit diesem congruirt.

3) Stellt man den Satz so allgemein hin, wie es hier geschehen ist, so muss man daran denken, dass bei gewissen Polarisationsrichtungen und Einfallswinkeln die Strahlen bei einer Brechung oder Reflexion ganz verlöschen könnten. Bei unseren Anwendungen auf die Be-

leuchtung des Auges treten solche Umstände nicht ein. Das Licht fällt auf die brechenden Flächen des Auges fast senkrecht ein, wobei seine etwa vorhandene Polarisation so gut wie keinen Einfluss auf die Stärke des gebrochenen und reflectirten Antheils hat. Uebrigens können wir die Schwächung der Strahlen durch Reflexion und Absorption an und in den Augenmedien vernachlässigen. Nur wenn man schräg gestellte Glasplatten als Reflector benutzt, muss man an die Schwächung des Lichts durch Reflexion denken.

Für die Intensität des hin und zurück gehenden Lichtstrahls lässt sich übrigens ebenfalls eine ganz entsprechende Regel von sehr ausgedehnter Gültigkeit aufstellen, die ausgesprochen zu haben hier genügen mag, da wir bei gegenwärtiger Anwendung das Princip in seiner allgemeineren Form nicht brauchen. Den Beweis kann sich übrigens Jeder, der die Gesetze der Optik kennt, leicht selbst führen. Man kann diese allgemeinere Regel folgendermassen aussprechen.

Ein Lichtstrahl gelange von dem Punkte A nach beliebig vielen Brechungen, Reflexionen u. s. w. nach dem Punkte B. In A lege man durch seine Richtung zwei beliebige, auf einander senkrechte Ebenen a_1 und a_2, nach welchen seine Schwingungen zerlegt gedacht werden. Zwei eben solche Ebenen b_1 und b_2 werden durch den Strahl in B gelegt. Alsdann lässt sich folgendes beweisen: Wenn die Quantität J nach der Ebene a_1 polarisirten Lichts von A in der Richtung des besprochenen Strahls ausgeht, und davon die Quantität K nach der Ebene b_1 polarisirten Lichts in B ankommt, so wird rückwärts, wenn die Quantität J nach b_1 polarisirten Lichts von B ausgeht, dieselbe Quantität K nach a_1 polarisirten Lichts in A ankommen.

Soviel ich sehe, kann hierbei das Licht auf seinem Wege der einfachen und doppelten Brechung, Reflexion, Absorption, gewöhnlichen Dispersion und Diffraction unterworfen sein, ohne dass das Gesetz seine Anwendbarkeit verliert, nur darf keine Aenderung seiner Brechbarkeit stattfinden, und es darf nicht durch Körper gehen, in denen der Magnetismus nach Faraday's Entdeckung auf die Lage der Polarisationsebene einwirkt.

Satz II.

Wenn die Pupille des beobachteten Auges leuchtend erscheinen soll, so muss sich auf seiner Netzhaut das Bild der Lichtquelle ganz oder theilweise mit dem Bilde der Pupille des Beobachters decken.

Wenn von irgend einer Stelle der Netzhaut des beobachteten Auges Licht in das Auge des Beobachters dringen soll, so muss diese Stelle erstens von der Lichtquelle erleuchtet sein, also dem Bilde der Lichtquelle angehören. Zweitens, wenn wir die Fiction machen, dass Licht von der Pupille des Beobachters ausgeht, so müsste nach dem vorigen Satze ebenso gut Licht von der Pupille des Beobachters zur betreffenden Stelle der Netzhaut des beobachteten Auges wie umgekehrt gehen können. Die Netzhautstelle muss also gleichzeitig dem Netzhautbilde der Pupille des Beobachters angehören, mag dieses Bild nun scharf oder ein Zerstreuungsbild sein.

Zusätze. 1) Dieser Satz gilt nicht nur für den Fall, wo die Strahlen auf geradem Wege von der Lichtquelle zum beobachteten Auge und von diesem zum Auge des Beobachters gehen, sondern auch wenn beliebig viele Linsen und Spiegel dazwischen geschoben sind. Dadurch erhält man ein bequemes Mittel, sich experimentell die Wirkung jedes Augenspiegels am eigenen Auge deutlich zu machen. Man stelle das zur Erleuchtung dienende Licht auf und bringe das Instrument vor sein Auge in dieselbe Lage, wie es sonst vor dem Auge des Beobachteten steht; der Theil des Gesichtsfeldes, welcher alsdann hell erscheint, entspricht dem Theile der Netzhaut, welcher beleuchtet ist. Man kann erkennen, ob das helle Feld gross oder klein, ob es gleichmässig erleuchtet ist, oder ob sich dunkle Stellen darin befinden, und wie dunkel diese sind. Alsdann nehme man die Flamme von der Stelle weg, wo sie zur Erleuchtung des Auges dient, und bringe sie hinter das Instrument, da wo sich sonst das Auge des Beobachters befindet, so dass das Licht durch die Oeffnung scheint, welche dem

Beobachter zum Durchsehen dient. Was jetzt im Gesichtsfelde erleuchtet ist, ist der Kreis, den der Beobachter von der Netzhaut übersehen kann.

Ich empfehle diesen Weg, um bei den verschiedenen Combinationen ebener und gekrümmter Spiegel, convexer und concaver Linsen in den Augenspiegeln sich die Wirkung klar zu machen, ohne dass man sich auf verwickelte geometrische Constructionen einzulassen braucht, die den Ungeübten leicht mehr verwirren als aufklären.

2) Was die Wirkung der in diesem Paragraphen beschriebenen Beleuchtungsweisen betrifft, so ordnet sich deren Wirkung leicht unter die hier aufgestellte Regel. Man erinnere sich daran, dass, wie die tägliche Erfahrung lehrt und eine einfache Construction des Ganges der Lichtstrahlen bestätigt, das Zerstreuungsbild eines fernen Gegenstandes nicht das scharfe Bild eines deutlich gesehenen näheren Gegenstandes bedecken kann, wohl aber das Zerstreuungsbild eines näheren Gegenstandes das scharfe Bild eines ferneren. Bei dem Versuche mit dem durchbohrten Spiegel bedeckt das Zerstreuungsbild der Oeffnung, durch welche der Beobachter blickt und welche sich möglichst nahe vor dem beobachteten Auge befinden muss, das entferntere, vielleicht deutlich gesehene Bild der Lichtflamme. Wenn man keinen Spiegel anwendet, sondern der Beobachter dicht an der Flamme vorbei nach dem beobachteten Auge sieht, erscheinen diesem Auge die Flamme und das Auge des Beobachters nahe neben einander, und sobald das beobachtete Auge nicht scharf für sie accommodirt ist, fliessen ihre Zerstreuungskreise in einander. Bei der Beleuchtung mit einer unbelegten Glasplatte können beide Bilder scharf sein, sowohl das des Lichts, wie das der Pupille des Beobachters. Ersteres wird von der Platte gespiegelt, letzteres durch die Platte gesehen, so dass beide auf einander fallen. Der Beobachtete kann deshalb selbst am leichtesten die Glasplatte so stellen, dass dem Beobachter sein Auge leuchtend erscheint. Er muss nur darauf achten, dass ihm das Auge des Beobachters von dem Spiegelbilde der Flamme gedeckt erscheine.

Ein solches Reciprocitätsgesetz, wie wir es eben dafür aufgestellt haben, dass überhaupt Licht von einem leuchtenden zu einem zu beleuchtenden Punkte hin und her gehe, lässt sich auch für die Quantität des hin und zurück gelangenden Lichts aufstellen. Wir erinnern zunächst an folgendes

Allgemeines Gesetz der Beleuchtung.

Wenn sich in einem durchsichtigen Medium zwei verschwindend kleine Flächenelemente von der Grösse a und b in der gegenseitigen Entfernung r befinden, ihre Normalen mit der sie verbindenden geraden Linie beziehlich die Winkel α und β bilden, und a mit der Helligkeit H Licht aussendet, so ist die Lichtmenge L, welche von a auf b fällt

$$L = \frac{H \cdot a\, b\, \cos \alpha\, \cos \beta}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1).$$

Ebenso gross ist auch die Lichtmenge, welche von b auf a fallen würde, wenn b mit der Helligkeit H Licht aussendete.

Satz III.

In einem centrirten Systeme von brechenden Kugelflächen sei n_1 das Brechungsverhältniss des ersten, n_2 das des letzten brechenden Mittels. In dem ersten befinde sich senkrecht gegen die Axe des Systems gerichtet und der Axe nahe ein Flächenelement α, in dem letzten ein eben solches β. Wenn α die Helligkeit $n_1^2 H$ hat, und β die Helligkeit $n_2^2 H$, so fällt ebenso viel Licht von α auf β, wie von β auf α.

Um den Beweis nicht complicirter zu machen, als unsere beabsichtigten Anwendungen verlangen, vernachlässigen wir dabei die Schwächungen, welche die Strahlen an den brechenden Flächen durch Reflexion erleiden, und nehmen an, dass die Einfallswinkel der Strahlen an den brechenden Flächen immer klein genug sind,

um ihre Cosinus gleich 1 setzen zu können, obgleich der Satz sich auch in allgemeinerer Form beweisen lässt.

1) Wenn β nicht am Orte des Bildes von a liegt.

Es sei $A\,C$ die optische Axe des brechenden Systems, F sein erster, G sein zweiter Hauptpunkt, α das erste Flächenelement, welches wir, da es verschwindend klein sein soll, nur durch einen Punkt in der Zeichnung dargestellt haben, γ sein Bild, $f_1 f_2$ der Durchschnitt des einfallenden Strahlenbündels in der ersten Hauptebene, $g_1\, g_2$ derselbe in der zweiten. Die Grundfläche des Strahlenbündels in der ersten Hauptebene ist congruent derselben in der zweiten; ihre gemeinsame Grösse sei Φ. Das zweite Flächenelement β liege in der Ebene, welche in B senkrecht gegen die optische Axe steht, und $b_1\, b_2$ sei der Durchschnitt des Strahlenbündels in dieser Ebene. Die Fusspunkte der von α und γ auf die optische Axe gefällten Lothe seien A und C.

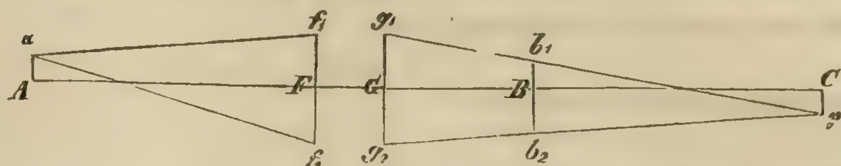


Fig. 91.

Die Lichtmenge, welche von α auf die Grundfläche des Strahlenkegels $f_1\, f_2$ fällt, ist nach Gleichung 1) gleich

$$\frac{n_1{}^2 H \cdot \alpha \cdot \Phi}{A\,F^2},$$

wenn $n_1{}^2\, H$ die Helligkeit von α ist. Dieselbe Lichtmenge fällt auch auf die weiteren Querschnitte des Strahlenkegels in $g_1\, g_2$ und $b_1\, b_2$. Die Lichtmenge nun, welche in der letzteren Ebene auf das Flächenelement β fällt, verhält sich zu der ganzen Lichtmenge, welche die Fläche $b_1\, b_2$ trifft, wie die Oberfläche von β zu dem Querschnitt des Strahlenkegels in $b_1\, b_2$, den wir mit Ξ bezeichnen wollen. Es ist also die ganze Lichtmenge X, welche von α auf β fällt, gleich

$$X = \frac{\Phi}{\Xi} \cdot \frac{n_1{}^2 H \alpha \beta}{A\,F^2} \quad \Big\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2).$$

Nun ist aber ferner

$$\frac{\Phi}{\Xi} = \frac{(g_1\, g_2)^2}{(b_1\, b_2)^2} = \frac{C\,G^2}{B\,C^2}.$$

Dieser Werth, in die Gleichung 2) gesetzt, giebt

$$X = n_1{}^2\, H \alpha \beta \frac{C\,G^2}{B\,C^2 \cdot A\,F^2}.$$

Da nun nach §. 9 Gleichung 8a)

$$\frac{G\,C}{A\,F} = \frac{F_2}{A\,F - F_1},$$

wo F_1 und F_2 die beiden Brennweiten des Systems sind, so ist

$$X = H \alpha \beta \cdot \frac{n_1{}^2\, F_2{}^2}{[A\,F \cdot F_2 + B\,G \cdot F_1 - A\,F \cdot B\,G]^2} \quad \Big\} \quad \ldots \quad 2a).$$

Ebenso bekommt man nun für die Lichtmenge Y, welche von β, wenn es mit der Helligkeit $n_2{}^2\, H$ leuchtet, auf α fällt, den Ausdruck

$$Y = H \alpha \beta \cdot \frac{n_2{}^2\, F_1{}^2}{[A\,F \cdot F_2 + B\,G \cdot F_1 - A\,F \cdot B\,G]^2} \quad \Big\} \quad \ldots \quad 2b).$$

Da auf beiden Seiten Alles symmetrisch ist, braucht man, um dies zu erhalten, in dem Ausdrucke für X nur zu vertauschen

$$A F \text{ mit } B G$$
$$F_1 \text{ mit } F_2$$
$$\alpha \text{ mit } \beta$$
$$n_1{}^2 H \text{ mit } n_2{}^2 H.$$

Da nun nach §. 9 Gleichung 9c)

$$n_1 F_2 = n_2 F_1,$$

so folgt aus 2a) und 2b)

$$X = Y,$$

was zu beweisen war.

2) Wenn β an den Ort des Bildes von α fällt.

Wir nehmen zuerst an, dass β in Grösse und Lage dem Bilde von α genau entspreche, dann entspricht auch α genau dem Bilde von β. Alles Licht also, was von α aus durch die brechenden Flächen dringt, fällt auf β, umgekehrt, alles, was von β durch die brechenden Flächen dringt, fällt auf α.

Wir behalten die Bezeichnungen der Figur 91 bei, nur dass wir uns das Element β jetzt in γ liegend denken.

Es ist die von α bei der Helligkeit $n_1{}^2 H$ auf die brechenden Flächen und also auch auf β fallende Lichtmenge X

$$X = n_1{}^2 H \frac{\alpha \Phi}{A F^2} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3a),$$

und die von β bei der Helligkeit $n_2{}^2 H$ auf die brechenden Flächen und also auch auf α fallende Menge Y

$$Y = n_2{}^2 H \frac{\beta \Phi}{G C^2} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3b).$$

Da nun β das Bild von α sein soll, so ist nach §. 9 Gleichung 8b), indem man berücksichtigt, dass α und β ähnliche Flächen, also dem Quadrate ihrer entsprechenden Lineardimensionen proportional sind

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{F_2{}^2}{(G C - F_2)^2},$$

und da ferner nach §. 9 Gleichung 8a)

$$G C - F_2 = \frac{G C \cdot F_1}{A F^2},$$

so folgt

$$\frac{\alpha F_1{}^2}{A F^2} = \frac{\beta F_2{}^2}{G C^2},$$

und da $F_1 : F_2 = n_1 : n_2$, so folgt

$$\frac{\alpha n_1{}^2}{A F_2} = \frac{\beta n_2{}^2}{G C^2} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3c).$$

Aus 3a), 3b) und 3c) zusammen folgt endlich

$$X = Y,$$

was zu beweisen war.

Sollte eines der beiden Elemente, z. B. α, grösser sein als das Bild von β, so würden die Theile von α, welche nicht zum Bilde von β gehören, weder Licht auf β werfen, noch von β empfangen können, es würde dadurch also weder X noch Y geändert werden und unser Satz richtig bleiben.

Zusätze. 1) Die ganze Beweisführung lässt sich ebenso gut auf centrirte Systeme brechender und spiegelnder Kugelflächen anwenden.

2) Die leuchtende und beleuchtete Fläche brauchen auch nicht verschwindend klein zu sein, wenn sie nur klein genug sind, dass die Cosinus der Einfallswinkel der Strahlen an den brechenden Flächen sich nicht merklich von 1 unterscheiden. Denn da für jedes Paar verschwindend kleiner Flächenelemente der beiden Flächen der Satz gilt, so gilt er auch für die ganzen Flächen.

Wenn wir den eben bewiesenen Satz auf die Verhältnisse des Augenleuchtens anwenden und das eine Flächenelement in die Netzhaut des beobachteten Auges verlegen, statt des anderen die Pupille des Beobachters setzen, übrigens den Unterschied der Brechung zwischen wässriger und gläserner Feuchtigkeit vernachlässigen und zwischen den beiden Augen ein beliebiges System centrirter brechender oder spiegelnder kugeliger Flächen angebracht denken, so können wir den Satz folgendermassen aussprechen:

Satz III a.

Die Menge Licht, welche von einem Flächenelemente der Netzhaut des beobachteten Auges in das Auge des Beobachters fällt, ist gleich der Helligkeit, mit der das Netzhautelement von der Lichtquelle erleuchtet wird, multiplicirt mit der Menge Licht, welche von der Pupille des Beobachters, wenn sie die Helligkeit = 1 hätte, auf das Netzhautelement fallen würde.

H sei die Helligkeit, mit der das Netzhautelement von der Lichtquelle erleuchtet wird, und k die Lichtmenge, welche von der Pupille des Beobachters, wenn diese mit der Helligkeit 1 leuchtet, auf das Netzhautelement fällt, so würde nach dem eben bewiesenen Satze k auch gleich der Lichtmenge sein, welche von dem Netzhautelemente, wenn dieses die Helligkeit 1 hätte, in die Pupille des Beobachters gelangte. Da dieses nun aber die Helligkeit H hat, so ist die Lichtmenge, welche von diesem Elemente wirklich in die Pupille des Beobachters gelangt, Hk, wie es unser Satz ausspricht.

Es ist dieser Satz gleichsam die weitere Ausführung des Satzes II, indem hier die quantitativen Bestimmungen gegeben werden, welche dort fehlten. Zunächst ist er nur erwiesen für Augenspiegel, an deren brechenden und spiegelnden Flächen die Lichtstrahlen nahe senkrecht einfallen und keinen erheblichen Verlust erleiden. Es ist aber leicht einzusehen, dass er auch für die Beleuchtung des Auges mit schief gestellten spiegelnden Glasplatten gilt, da unpolarisirtes Licht, vom beobachtenden zum beobachteten Auge durch eine solche Platte gehend, ebenso stark geschwächt wird, als wenn es den umgekehrten Weg verfolgte.

Satz IV.

Wenn ein Beobachter durch ein centrirtes System brechender und spiegelnder Kugelflächen ein scharfes Bild eines leuchtenden Gegenstandes erblickt und wir den Verlust von Licht an den brechenden und spiegelnden Flächen vernachlässigen können, so erscheint jede Stelle des Bildes dem Beobachter ebenso hell, wie ihm die entsprechende Stelle des Gegenstandes ohne optische Instrumente gesehen erscheinen würde, so oft die ganze Pupille des Beobachters von den Strahlen getroffen wird, die von einem einzelnen Punkte jener Stelle ausgehen. Ist diese letztere Bedingung nicht erfüllt, so verhält sich die Helligkeit des optischen Bildes zur Helligkeit des frei gesehenen Gegenstandes, wie der von Strahlen eines leuchtenden Punktes getroffene Flächenraum der Pupille des Beobachters zur ganzen Pupille.

Wenn das Auge direct oder durch ein centrirtes optisches System ein deutliches Bild eines Gegenstandes sieht, so können wir das Auge mit dem vorgesetzten

optischen Systeme zusammen wiederum als ein optisches System betrachten, welches ein Bild des Gegenstandes auf der Netzhaut entwirft. Es sei a ein Flächenelement des Gegenstandes, b sein Bild auf der Netzhaut. So viel Licht von a nach b geht, würde auch nach Satz III dieses Paragraphen von b nach a gehen, wenn dem Netzhautelemente b die Helligkeit $\frac{(n_2)^2}{(n_1)^2} H$ ertheilt würde. In diesem Ausdrucke ist H die Helligkeit des Elements a, n_1 das Brechungsverhältniss des Mediums, in dem sich a befindet, n_2 das des Glaskörpers. Es lässt sich aber leicht berechnen, wie viel Licht von b nach a unter diesen Umständen gehen würde. Ist q der Querschnitt des von einem Punkte von b nach einem Punkte von a gehenden Strahlenbündels in der Pupille, so ist die von b nach a gehende Lichtmenge M gleich der von b nach q gehenden, und diese ist

$$M = \frac{n_2{}^2}{n_1{}^2} H \cdot \frac{q\,b}{R^2},$$

worin R den Abstand der Pupille von der Netzhaut bedeutet. Streng genommen würde hier unter q der Querschnitt des Strahlenbündels in dem von der Linse entworfenen Bilde der Pupille, und unter R die Entfernung dieses Bildes von der Netzhaut zu verstehen sein. In diesem Ausdrucke für die Lichtmenge, welche von dem leuchtenden Flächenelemente H in das Auge fällt, sind zwei Grössen, welche von der Beschaffenheit des dem Auge vorgesetzten optischen Systems abhängen, nämlich q der Querschnitt des Strahlenbündels in der Pupille und b die Grösse des Bildes auf der Netzhaut.

Die Helligkeit dieses Bildchens hängt nun aber nicht nur von der einfallenden Lichtmenge ab, sondern auch von der Grösse der Fläche b, über welche die Lichtmenge ausgebreitet wird, und ist der letzteren umgekehrt proportional. Setzen wir als Einheit der Beleuchtungsstärke die Lichtmenge, welche die Einheit der Fläche trifft, so ist die Beleuchtungsstärke J des Netzhautelements b

$$J = \frac{M}{b} = \frac{n_2{}^2}{n_1{}^2} H \cdot \frac{q}{R^2},$$

in welchem Ausdrucke nur noch q von der Beschaffenheit des optischen Systems abhängig ist. Sieht das Auge frei den Gegenstand an, so füllt das Strahlenbündel die ganze Pupille, deren Querschnitt Q sei, und die Beleuchtungsstärke wird

$$J = \frac{(n_1)^2}{(n_2)^2} H \cdot \frac{Q}{R}.$$

Grösser als Q kann q niemals werden; dieser letztere Ausdruck ist also das Maximum der Helligkeit; er stellt die natürliche Helligkeit des Bildes dar. Die Helligkeit ausgedehnter Flächen kann durch optische Instrumente nie grösser, nur kleiner werden, wenn q kleiner als Q, und verhält sich dann zur natürlichen Helligkeit wie q zu Q.

Zusätze. 1) Nur wenn wir verschwindend kleine leuchtende Punkte durch optische Instrumente betrachten, deren Bild auch bei den stärksten Vergrösserungen nur die Ausdehnung der kleinsten Zerstreuungskreise auf der Netzhaut bedeckt, also immer dieselbe Flächenausdehnung behält, können optische Instrumente die Helligkeit vergrössern. Dies geschieht z. B. für die Fixsterne, und deshalb können auch Fixsterne durch stark vergrössernde Fernröhre mit grossen Aperturen bei Tage sichtbar gemacht werden. Die scheinbare Helligkeit des Fixsterns steigt proportional der Lichtmenge, welche das Instrument in seinen Focus vereinigt, während die Helligkeit des Himmelsgewölbes im Fernrohre nicht vermehrt wird.

2) Auch wenn Zerstreuungsbilder einer leuchtenden Fläche von gleichmässiger Helligkeit im Auge entworfen werden, kann die Helligkeit des Netzhautbildes nur gleich, nie grösser werden als die Helligkeit bei freier Betrachtung der Fläche. Der Beweis lässt sich ganz so

führen wie für scharf gesehene Bilder, da Satz III für scharfe Bilder und für Zerstreuungsbilder gleichmässig gilt. Auch hier ist die Helligkeit proportional dem Querschnitt des Strahlenbündels in der Pupille, welches von dem entsprechenden Punkte der Netzhaut bis nach der leuchtenden Fläche gelangen kann.

Ich erlaube mir zu bemerken, dass gegen die hier entwickelten Grundsätze der Helligkeit dioptrischer und katoptrischer Apparate noch oft gesündigt wird. Man glaubt noch oft, dass, wenn man Licht durch Sammellinsen oder Hohlspiegel in das Auge, in Mikroskope u. s. w. fallen lässt, man dadurch nicht blos die scheinbare Grösse der leuchtenden Fläche, sondern auch ihre scheinbare Helligkeit vermehren könne. Der Vermehrung des in das Auge fallenden Lichts, welches durch solche Mittel erreicht werden kann, entspricht stets eine entsprechende Vergrösserung des Bildes, so dass das Bild eben nur grösser, nicht heller wird. Durch kein optisches Instrument kann man die Helligkeit einer leuchtenden Fläche von erkennbaren Dimensionen für das Auge grösser machen, als sie dem blossen Auge erscheint. Ebenso wenig kann eine beleuchtete Fläche jemals eine grössere Helligkeit bekommen, als die leuchtende hat.

Satz V.

Allgemeines Verfahren, die Helligkeit zu bestimmen, mit welcher dem Beobachter durch einen Augenspiegel eine Stelle der Netzhaut des beobachteten Auges erscheint.

a) Wenn der Verlust, den die einzelnen Strahlen an den brechenden und reflectirenden Flächen erleiden, vernachlässigt werden kann. Es sei x ein Punkt an der betreffenden Stelle der Netzhaut; wir haben zu untersuchen, wie das Strahlenbündel verläuft, welches von x nach der Pupille desselben Auges geht. Nach Satz I und II muss ein Theil dieses Strahlenbündels zum leuchtenden Körper, ein anderer zur Pupille des Beobachters gehen. Es sei P der Querschnitt der Pupille des beobachteten Auges, p in dieser Pupille der Querschnitt desjenigen Theils des Strahlenbündels, welches zum leuchtenden Körper zurückgelangt, H die Helligkeit, welche der betreffenden Netzhautstelle zukommen würde, wenn das beobachtete Auge, frei nach dem leuchtenden Körper blickend, auf ihr ein Bild dieses Körpers entwürfe. Wir können diese die normale Helligkeit nennen. Sie hängt natürlich wesentlich von der Structur der Netzhaut selbst ab, ferner von der Helligkeit des leuchtenden Körpers und der Weite der Pupille P. Bei Anwendung des Augenspiegels muss nothwendig die wirkliche Helligkeit der Netzhautstelle kleiner werden, nämlich

$$\frac{p}{P} H.$$

Weiter ermittele man den Querschnitt q, den der Theil des von x ausgegangenen Strahlenbündels, welcher in die Pupille des Beobachters gelangt, in dieser Pupille hat, deren ganzer Flächeninhalt Q sei, so ergiebt sich schliesslich für die Helligkeit der Netzhautstelle, wie sie dem Beobachter erscheint,

$$\frac{q \cdot p}{Q \cdot P} H.$$

b) Wenn die Strahlen durch Spiegelung oder Brechung einen merklichen Verlust erleiden. Unter den bisher construirten Formen der Augenspiegel kommt ein solcher nur bei dem von mir angegebenen mit unbelegten spiegelnden Platten vor. Das vom Auge zum leuchtenden Körper gehende Strahlenbündel wird in diesem Falle und allen ähnlichen ebenso viel verlieren als die vom Lichte wirklich zum Auge gehenden Strahlen. Man braucht also auch nur den Verlust des ersteren zu berechnen. Es möge von einem Strahl, der vom Licht zum beobachteten Auge geht und dessen Intensität 1 ist, α im Auge ankommen, und von einem eben solchen Strahle, der vom beobachteten Auge ausgeht, β in dem des Beobachters

ankommen, dann müssen wir den obigen Ausdruck für die Helligkeit noch mit α und β multipliciren; er wird also

$$\frac{\alpha \cdot \beta \cdot p \cdot q}{P \cdot Q} H.$$

Durch die in den vorstehenden Sätzen vollzogene Umkehr des Problems von der Erleuchtung des Auges haben wir die Untersuchung der Helligkeit der Bilder für jeden Fall auf die Bestimmung des Ganges eines einzigen Strahlenbündels reducirt, während es sonst nöthig war, die Helligkeit einer einzelnen Netzhautstelle aus der Helligkeit aller über einander gelagerten Zerstreuungskreise, welche den einzelnen Punkten der Lichtquelle entsprechen, durch Summation zu bestimmen. Auch glaube ich, dass die Sache dadurch der Anschauung zugänglicher wird. Den Gang der Strahlen von einem Netzhautpunkte durch die verhältnissmässig einfachen optischen Systeme der Augenspiegel, von denen eines zur Beleuchtung, eines zur Beobachtung dient, einzeln genommen kann man sich leicht veranschaulichen, während die ganze Uebersicht des Ganges der Lichtstrahlen von der Lichtquelle bis zum Auge des Beobachters meist deshalb schwierig wird, weil auf der Netzhaut eine unendliche Zahl in einander greifender Zerstreuungskreise der Punkte der Lichtquelle und der Pupille des Beobachters entstehen.

Satz VI.

Die Mittel, ein deutliches Bild des Augenhintergrundes zu erhalten.

A Fig. 92 sei das beobachtete Auge, *a* ein Punkt seiner Netzhaut, dessen Bild von den Augenmedien in *b* entworfen wird, in der Entfernung, wo das beobachtete Auge

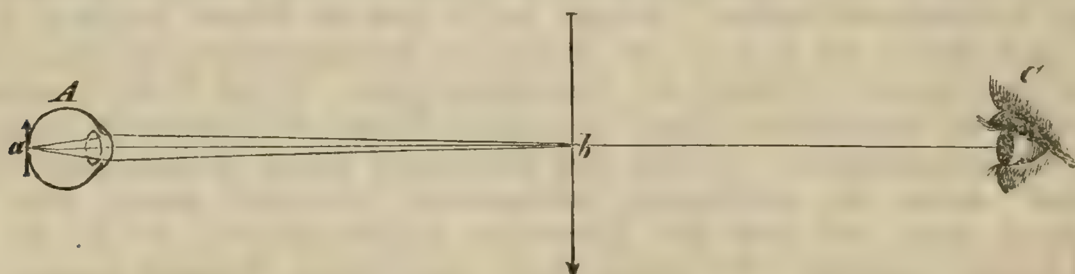


Fig. 92.

deutlich sieht. Die beiden Pfeile, welche bei *a* und *b* gezeichnet sind, entsprechen der Grösse der zusammengehörigen Bilder. Das Bild der Netzhautstelle ist vergrössert und umgekehrt. Ein Beobachter, welcher ohne weitere Hülfsmittel dies Bild der Netzhaut in *b* sehen wollte, müsste also noch weiter entfernt vom Auge *A*, etwa in *C* sich befinden, so dass die Entfernung *Cb* wieder gleich der Sehweite des Beobachters würde. Hierbei würde aber das von der Pupille des beobachteten Auges begrenzte Gesichtsfeld des Beobachters so klein sein, dass er doch nichts erkennen könnte.

Es sind bisher zwei Hauptmethoden angewendet worden, um die Lage des Bildes *b* dem Beobachter bequemer zu machen. Bei der einen wird ein virtuelles aufrechtes Bild der Netzhaut, bei der anderen ein reelles umgekehrtes entworfen.

A. Darstellung der Netzhaut im virtuellen aufrechten Bilde.

Man wendet dazu eine Concavlinse *B* in *Fig. 93* an, deren Brennweite *Bp* kleiner ist als die Entfernung des Punktes *b* von ihr. Eine solche macht die von *A* nach *b* hin convergirenden Lichtstrahlen wieder divergent, so dass sie von einem scheinbar bei *d* im Rücken des beobachteten Auges gelegenen

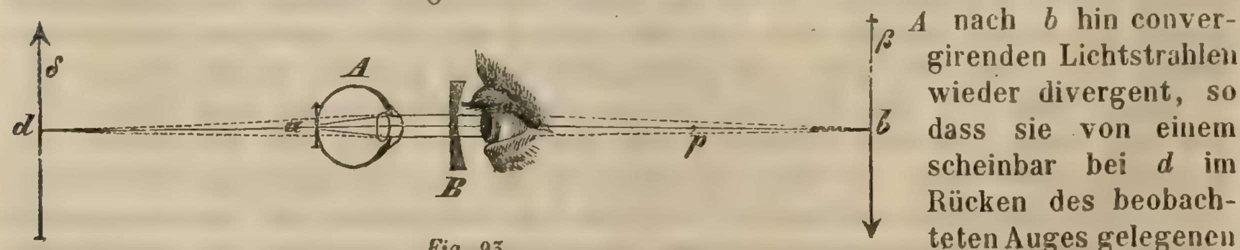


Fig. 93.

Punkte zu kommen scheinen. Die Pfeile bezeichnen wieder Lage und Grösse der Netzhautstelle und ihrer Bilder.

Nennen wir p die negative Brennweite der Concavlinse, α die Entfernung Bb γ die Entfernung dB, so ist

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{p};$$

γ muss gleich der Sehweite des Beobachters sein, wenn er das bei d entworfene Bild der Netzhaut deutlich sehen soll; α hängt von der Accommodationsweite Ab des beobachteten Auges und der Entfernung A von B ab. Hat man den Werth beider Grössen festgestellt, so kann man aus der gegebenen Gleichung den Werth von p berechnen, welcher gewählt werden muss, um deutliche Bilder zu geben.

Wären beide Augen für unendliche Ferne accommodirt, also $\alpha = \gamma = \infty$, so würde auch $p = \infty$ werden müssen, d. h. es wäre gar keine Linse nothwendig.

Auch für die seitlich gelegenen Theile der Netzhaut ist gewöhnlich keine Linse nothwendig, weil diese vor den dorthin fallenden Vereinigungspunkten der Lichtstrahlen weit entfernter Lichtpunkte zu liegen scheinen, und die Augenmedien von ihnen daher selbst schon ein dem Beobachter passendes Bild entwerfen.

Das Netzhautbild in d ist bei dieser Beobachtungsweise aufrecht.

Was die Vergrösserung betrifft, so denke man in b einen leuchtenden Gegenstand, dessen Bild auf der Netzhaut in a entworfen werden würde. Die rückkehrenden Strahlen bilden ein Bild des Netzhautbildes, welches nach den vorher auseinandergesetzten Grundsätzen des Augenleuchtens dem leuchtenden Gegenstande in b congruent ist. Nennt man β die Grösse des leuchtenden Gegenstandes und des ihm gleichen Bildes in b, δ die des vom Beobachter gesehenen Bildes in d, so ist

$$\frac{\beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\gamma}.$$

Als Maas für die scheinbare Grösse des gesehenen Bildes können wir seine Grösse dividirt durch seine Entfernung von dem sehenden Auge gebrauchen. Befindet sich das Auge des Beobachters dicht hinter dem Concavglase, so wäre die scheinbare Grösse des Bildes

$$\frac{\delta}{\gamma} = \frac{\beta}{\alpha}.$$

Nennen wir die Entfernung AB nun q, so ist die scheinbare Grösse des Objects b für das Auge a

$$\frac{\beta}{\alpha + q},$$

also etwas kleiner als die des Bildes δ für den Beobachter. Ist die Sehweite des Auges A sehr viel grösser als q, so kann man q gegen α vernachlässigen, und findet auch für das beobachtete Auge die scheinbare Grösse des leuchtenden Gegenstandes gleich $\frac{\beta}{\alpha}$.

Die Netzhautbilder des beobachteten Auges erscheinen also bei dieser Anordnung dem Beobachter unter gleichem oder etwas grösserem Gesichtswinkel als die entsprechenden Gegenstände dem beobachteten Auge.

Daraus ergiebt sich nun leicht die Vergrösserung der Netzhauttheile des beobachteten Auges. Ist x die Grösse des auf der Netzhaut in a entworfenen Bildes von β, und y der Abstand der Netzhaut vom hinteren Knotenpunkte des Auges, so verhält sich

$$\frac{x}{\beta} = \frac{y}{\alpha + q}$$

$\frac{\beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\gamma}$. Beides multiplicirt giebt:

$$\frac{x}{\delta} = \frac{y \cdot \alpha}{\gamma\,(\alpha + q)}.$$

y ist in Listing's schematischem Auge gleich 15,0072 Mm. (oder 6,694 Par. Lin.), γ ist hier nach der bei der Berechnung von Vergrösserungen angenommenen Norm der Sehweite gleich 8 Zoll zu setzen. Daraus ergiebt sich die Vergrösserung

$$\frac{\delta}{x} = 14,34 \; \frac{\alpha + q}{\alpha}.$$

Da q gegen α gewöhnlich sehr klein ist, können wir die Vergrösserung gleich $14\frac{1}{3}$ mal annehmen.

Das Gesichtsfeld, welches man übersieht, ist bei dieser Methode durch den undeutlich gesehenen Rand der Pupille des beobachteten Auges nicht scharf begrenzt. Um eine bestimmte Grenze passend zu wählen, kann man die nach dem Rande der Pupille des beobachteten Auges gezogenen Visirlinien des Beobachters nehmen, deren Kreuzungspunkt [1] im Mittelpunkte der Pupille des Beobachters liegt. Wenn man diese Visirlinien wie Lichtstrahlen behandelt, die von dem Mittelpunkte der Pupille des Beobachters ausgehen, findet man, dass das Gesichtsfeld des Beobachters auf der Netzhaut des beobachteten Auges dem Zerstreuungsbilde entspricht, in welchem der Mittelpunkt der Pupille des Beobachters dort erscheint. Liegt dieser Mittelpunkt oder vielmehr sein durch die Concavlinse gesehenes Bild im ersten Brennpunkte des beobachteten Auges, so ist der Zerstreuungskreis, wie im vorigen Paragraphen bei den entoptischen Erscheinungen nachgewiesen ist, ebenso gross wie die Pupille des beobachteten Auges. Meist wird aber das Auge des Beobachters sich dem beobachteten Auge nicht so weit nähern können, und dann wird der dem Gesichtsfelde gleiche Zerstreuungskreis kleiner als die Pupille des beobachteten Auges werden, um so kleiner, je weiter der Beobachter sich entfernt.

B. Darstellung der Netzhaut im reellen umgekehrten Bilde.

Die zweite Methode, das Bild der Netzhaut dem Beobachter bequem sichtbar zu machen, besteht darin, dass man nahe vor das beobachtete Auge eine Convexlinse von kurzer Brennweite, 1 bis 3 Zoll, hält. Es sei wieder in *Fig. 94* a ein beleuchteter Punkt der Netzhaut, b sein Bild ausserhalb des beobachteten Auges A, B eine Convexlinse, auf welche die Strahlen fallen, ehe sie sich zum Bilde vereinigen. Diese entwirft ein kleineres und näheres Bild, als b ist, in d, ebenfalls in umgekehrter Stellung, wie das in b.

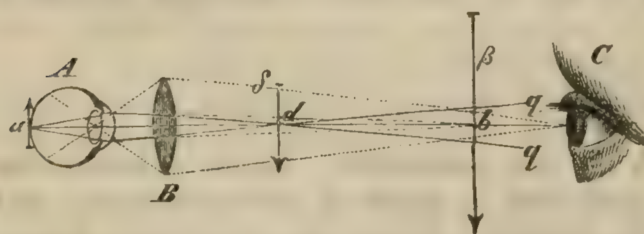


Fig. 94.

Das Auge des Beobachters befindet sich in C, so weit entfernt, als es zur Accommodation dieses Auges für das Bild nothwendig ist.

Ist p die positive Brennweite der Linse B, und wird die Entfernung Bb wieder mit α, Bd mit γ bezeichnet, so ist

$$\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{p}.$$

---

[1] S. §. 11. S. 93.

Da α meist sehr viel grösser ist als p, so wird γ nahehin gleich p, bleibt aber stets etwas kleiner.

Die Grösse eines Netzhauttheiles im Punkte a sei x, die seines Bildes in b sei β, die des letzten Bildes in d sei δ, und die Entfernung der Netzhaut vom hinteren Knotenpunkte des Auges sei y, die Entfernung des ersten Hauptpunktes der Linse B vom vorderen Knotenpunkte des Auges A sei q, so ist

$$\frac{x}{\beta} = \frac{y}{\alpha + q}$$

$$\frac{\beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\gamma}.$$ Beides multiplicirt giebt

$$\frac{x}{\delta} = \frac{y \cdot \alpha}{\gamma \cdot (\alpha + q)} = \frac{y \cdot (\alpha + p)}{p\,(\alpha + q)}.$$

In der Regel stellt man die Linse B so, dass die Pupille von A in ihrem einen Hauptbrennpunkte liegt, dann wird also p nahehin gleich q, und die Vergrösserung

$$\frac{\delta}{x} = \frac{p}{y}.$$

Nehmen wir für y den Werth aus LISTING's schematischem Auge, so ergiebt sich, dass das Bild δ

2 mal vergrössert ist, wenn $p = 30$ Mm. (13,4 ''')
3 mal wenn $p = 45$ Mm. (20,1 ''')
4 mal wenn $p = 60$ Mm. (26,8 ''').

Dies ist die wirkliche Vergrösserung des objectiven Bildes. Die Vergrösserung für den Beobachter, wenn die Entfernung Cd gleich c gesetzt wird, ist

$$\frac{p}{y\,c} \times 8 \text{ Zoll.}$$

Das Gesichtsfeld sieht der Beobachter bei dieser Methode begrenzt durch die Pupille des beobachteten Auges, so lange die Convexlinse diesem Auge sehr nahe steht. Je weiter man die Convexlinse aber entfernt, desto stärker vergrössert erscheint die Pupille, bis sie endlich in die Nähe des Brennpunktes der Glaslinse kommt, dann verschwindet der Pupillarrand ganz aus dem Gesichtsfelde, und die Ausdehnung des letzteren wird nur noch von der Apertur dieser Linse bestimmt. Um die Grösse des Gesichtsfeldes zu bestimmen, können wir wieder, wie in dem vorigen Falle, die Visirlinien des Beobachters wie Lichtstrahlen behandeln. Zunächst entwirft die Linse B ein Bild vom Kreuzungspunkte der Visirlinien in der Nähe ihres Brennpunktes, also nahehin in der Ebene der Pupille des beobachteten Auges. Von da divergiren die Visirlinien nach dem Hintergrund des beobachteten Auges hin. Da ihr Vereinigungspunkt in der Nähe des vorderen Knotenpunktes des beobachteten Auges liegen wird, oder vielleicht auch, je nach der Stellung der Linse B, ganz mit diesem Knotenpunkte zusammmenfallen wird, so gehen die Visirlinien des Beobachters fast ungebrochen in das beobachtete Auge hinein. Ihr Gang ist in *Fig. 94* durch die punktirten Linien angedeutet. Ist die Apertur der Linse B gleich u, der Durchmesser des Gesichtsfeldes auf der Netzhaut gleich v, so ist

$$\frac{v}{y} = \frac{u}{p}.$$

Da man bei so kleinen Linsen recht gut die Apertur gleich der halben Brennweite machen kann, also $u = \frac{1}{2}p$, so wird alsdann

$$v = \tfrac{1}{2}y = 7\tfrac{1}{2} \text{ Mm.}$$

Man übersieht also in diesem Falle ein grösseres Gesichtsfeld, als es ohne künstliche Erweiterung der Pupille durch Atropin bei der Beobachtung mit Concavgläsern möglich ist.

VII.

Beleuchtungsapparate der Augenspiegel.

Nach den drei oben angeführten Methoden kann die Beleuchtung direct mit einem Lichte geschehen, oder mit einem durchbohrten undurchsichtigen Spiegel, oder mit umgelegten, also durchsichtigen Glasplatten als Spiegel.

Beleuchtung ohne allen Spiegel lässt sich nur für das umgekehrte Bild der Netzhaut anwenden, erfordert eine beträchtliche Geschicklichkeit, und wäre etwa nur da zu empfehlen, wo gerade kein anderes Instrument als eine einfache Convexlinse von kurzer Brennweite zur Hand ist. Die Ausführung der Beobachtung ist folgende. Der Beobachter sieht dicht neben einem Lichte vorbei und, durch einen Schirm gegen dessen directe Strahlen geschützt, wie es in *Fig. 88* abgebildet ist, nach dem beobachteten Auge hin, und bringt eine Convexlinse von 2 bis 4 Zoll Brennweite vor dieses Auge, wie in *Fig. 94.* Um die richtige Stellung zu finden, bringt man diese Linse zuerst ganz dicht vor das beobachtete Auge, und entfernt sie allmälig so weit, bis man die Pupille so stark vergrössert erblickt, dass ihre Ränder hinter denen der Linse verschwinden. Man erblickt dann ein umgekehrtes reelles Bild der Netzhaut bei *d Fig. 94.* Um die Helligkeit dieses Bildes zu bestimmen, verfolgen wir nach den Vorschriften von Nr. V dieses Paragraphen das Strahlenbündel, welches vom Netzhautpunkte *a Fig. 94* ausgeht; es wird von den brechenden Flächen des Auges nach *b* hin, darauf von der Linse *B* nach *d* hin convergent gemacht, divergirt hinter *d*, und ist bei *q q* am Auge des Beobachters jedenfalls breit genug, dass die Pupille des Beobachters ganz hineintauchen und also die Netzhautstelle mit ihrer ganzen wirklichen Helligkeit sehen kann. Diese wirkliche Helligkeit verhält sich zur normalen oder grösstmöglichen Helligkeit nach V wie der Theil des Strahlenkegels *q q*, der die Flamme trifft, zum ganzen Strahlenkegel. Wenn nun die Flamme hinreichend gross und passend gestellt ist, so brauchen nur sehr wenig Strahlen des Kegels *q q* bei der Flamme vorbei zu gehen, um die Pupille des Beobachters auszufüllen. Dann wird die wirkliche Helligkeit der Netzhautstelle *a* sehr wenig kleiner sein als die normale Helligkeit, und die scheinbare Helligkeit für den Beobachter gleich der wirklichen.

Sehr viel bequemer wird die Beobachtung, wenn der Beobachter einen durchbohrten undurchsichtigen Spiegel anwendet, um das Auge *A* zu erleuchten. Es sei in *Fig. 95* wieder *A* das beobachtete, *B* das beobachtende Auge, *C* die Convexlinse, und *S S* ein durchbohrter Spiegel. Von dem Netzhautpunkte *a* wird ein Bild bei *d* entworfen, welches der Beobachter durch die Oeffnung des Spiegels hin betrachtet. Von dem ganzen von *a* kommenden Strahlenkegel geht nur der schmale Theil für die Beleuchtung verloren, welcher durch die Oeffnung des Spiegels fällt, der ganze übrige Theil wird reflectirt und kann dem leuchtenden Körper zugelenkt werden. Zu dem letzteren Ende ist entweder der Spiegel *S S* ein Hohlspiegel (Ruete), oder aber ein Planspiegel (Coccius) oder Concavspiegel (Zehender), neben dem man eine Linse *L* angebracht hat, welche die Strahlen auf den leuchtenden Körper vereinigt. Aus dieser Darstellung folgt schon nach Nr. V, dass die Helligkeit der Erleuchtung nahezu die normale sein kann.

Das Gesichtsfeld für den Beobachter fanden wir bedingt durch die Grösse der Linse *C*, wenn die Pupille im Brennpunkte dieser Linse steht. Es fragt sich, ein wie grosser Theil der Netzhaut erleuchtet werden kann. Da alles Licht durch die Linse *C* in das Auge des Beobachters fällt, kann natürlich das beleuchtete Feld der

Netzhaut nicht grösser als das Zerstreuungsbild der Linse C sein, welches selbe Zerstreuungsbild auch, wie wir in VI gezeigt haben, dem Gesichtsfelde des Beobachters entspricht. Dies Zerstreuungsbild wird in allen Theilen sein Maximum der Hellig-

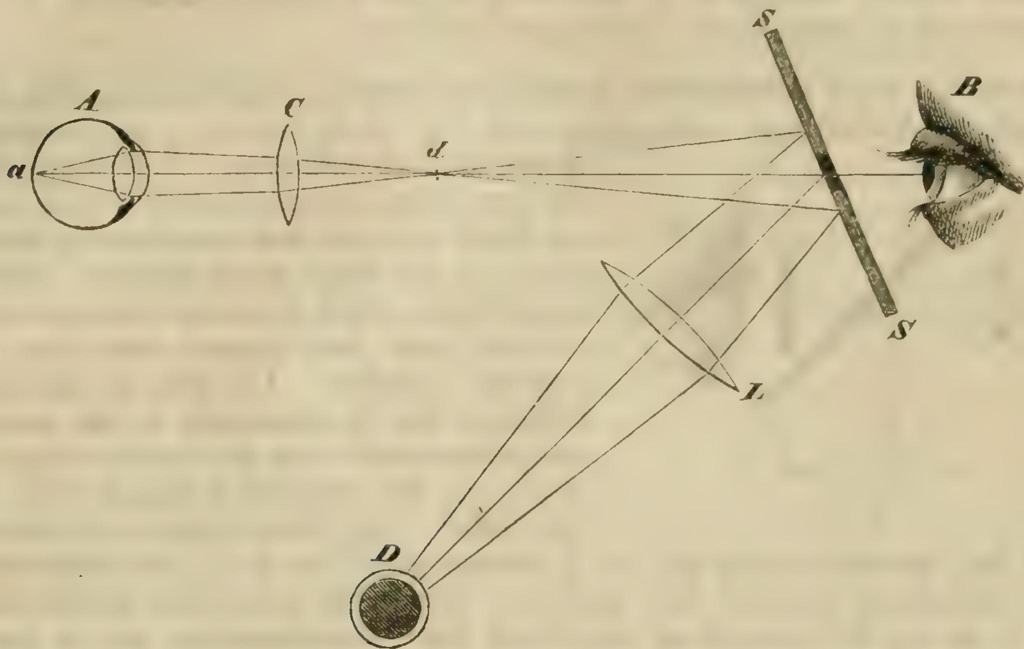


Fig. 95.

keit haben, wenn von jedem Theil der Linse C Licht auf jeden Theil der Pupille fällt. Diese Bedingung wird erfüllt sein, wenn die Pupille des beobachteten Auges gleich oder kleiner als das Bild ist, welches die Linse C in der Nähe der Pupille von dem Spiegel $S\,S$ (oder der Linse L) entwirft, und von jedem Punkte dieses Spiegels, mit nothwendiger Ausnahme der mittleren Durchbohrung, Licht auf jeden Theil der Linse C fällt. Das Letztere wird aber wiederum geschehen, wenn die Linse C an dem Orte steht, wo der Spiegel das Bild der Lampenflamme D entwirft, und die Linse gleich oder kleiner als dieses Bild ist.

Um ein Beispiel solcher Construction zu geben, wollen wir annehmen, man verlange von dem Augenspiegel eine viermalige Vergrösserung und gebe dem entsprechend der Linse C eine Brennweite von 60 Mm. und eine Apertur von 30 Mm. Der Spiegel, welcher ein durchbohrter Convexspiegel sein möge, muss so weit von dem Orte des Bildes d entfernt sein, dass der Beobachter sein Auge für das Bild accommodiren kann, also etwa 150 Mm. Dann steht der Spiegel S von der Linse C 210 Mm. ab. Nach der Gleichung §. 9 Nr. 14b) wird sein von der Linse entworfenes Bild $= {}^{60}/_{150} = {}^{2}/_{5}$ seiner eigenen Grösse sein. Da nun sein Bild der Pupille des beobachteten Auges gleich sein soll, und diese bei künstlicher Erweiterung bis auf 10 Mm. Durchmesser kommen kann, so müssen wir dem Spiegel 25 Mm. Durchmesser geben.

Die Brennweite, welche wir dem Spiegel geben müssen, bestimmt sich nun durch die Bedingung, dass er ein Bild der Lampenflamme entwerfen muss, welches die Linse C deckt. Die Flamme grösserer Argand'scher Brenner hat etwa 15 Mm. Durchmesser. Setzen wir in §. 9 Gleichung 14b) für β_1 den Durchmesser der Linse C 30 Mm., für β_2 den Durchmesser der Lampenflamme 15 Mm., für f_1 die Entfernung $C\,S$ gleich 210 Mm., so wird die Brennweite F des Spiegels gefunden gleich 70 Mm., und die Lampenflamme muss 105 Mm. vom Spiegel entfernt sein.

Wenn man nicht einen Concavspiegel, sondern einen ebenen Spiegel und eine convexe Glaslinse wie in *Fig. 95* anwenden will, muss man statt der Entfernung des Spiegels von der Linse C in der Rechnung die Summe der Entfernungen der beiden Linsen L und C von der Mitte des Spiegels nehmen.

Wenn der Beobachter den Spiegel und die Linse frei in der Hand hält, wird es natürlich nicht möglich sein, die Entfernungen dieser Theile, die der Rechnung zu Grunde gelegt sind, genau einzuhalten, und man wird auch bei ziemlich grossen Abweichungen davon noch gute Bilder erhalten; dennoch ist es aber wohl für den Beobachter vortheilhaft, die besten Bedingungen für die Haltung seines Instruments zu kennen.

Wenn mit einem durchbohrten Spiegel und einem Concavglase beobachtet werden soll, sind die Verhältnisse ungünstiger. In *Fig. 96* ist wieder *A* das beobachtete, *B* das beobachtende Auge, *S* der Spiegel. Soll der Netzhautpunkt *a* beobachtet werden, so muss ein Theil des von ihm ausgehenden Strahlenkegels in das Auge des Beobachters fallen, wir wollen diesen Theil α nennen, ein anderer Theil $(1-\alpha)$ von dem Spiegel nach dem Lichte reflectirt werden. Ist also *H* die normale Helligkeit der Netzhautstelle *a*, so wird unter diesen Umständen nach Nr. V dieses Paragraphen $H(1-\alpha)$ ihre wirkliche Helligkeit sein. Es sei wie früher *J* der Flächeninhalt der scheinbaren Pupille des beobachteten Auges *A*, *R* ebenderselbe von *B*, *g* die Entfernung der beiden scheinbaren Pupillen von einander, und *h* die Accommodationsdistanz des Auges *A*, so ist der Querschnitt des Theils des Strahlenbündels, der in das Auge des Beobachters fällt,

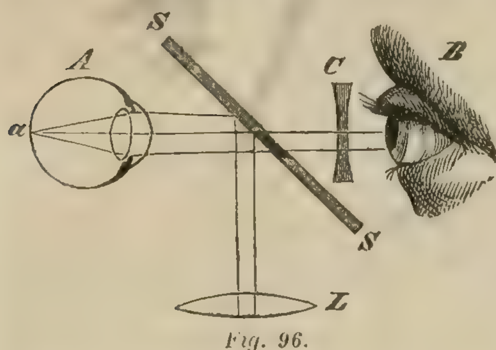


Fig. 96.

$$\alpha J \cdot \frac{(h-g)^2}{h^2}.$$

Dieser Querschnitt wird in der Regel kleiner sein als *R*. Die scheinbare Helligkeit für den Beobachter wird dann

$$H \cdot \alpha(1-\alpha)\frac{J \cdot (h-g)^2}{R h^2}.$$

Die Grösse $\alpha(1-\alpha)$ erreicht ihr Maximum, wenn $\alpha = 1/2$, sie wird alsdann gleich $1/4$. Die vortheilhafteste Anordnung in Bezug auf Helligkeit wird also die sein, wo die Hälfte des Strahlenkegels in das Auge des Beobachters fällt, die Hälfte zurückgeworfen wird. Man erreicht dann die Helligkeit

$$1/4\, H \cdot \frac{J \cdot (h-g)^2}{R h^2}.$$

Um ein möglichst grosses Feld in dem beobachteten Auge zu beleuchten, wende man eine grosse und nahestehende Lampenflamme an, oder wenn dies nicht zureicht, kann man bei *L* eine Sammellinse anbringen. Entwirft diese ein Bild der Flamme, welches die Pupille ganz deckt, so wird im Auge *A* das ganze Zerstreuungsbild der Linse *L* beleuchtet.

Für die Beobachtung mit Convexlinsen würde die Beleuchtung mit unbelegten Glasplatten nur $1/4$ der Helligkeit geben, welche man mit durchbohrten undurchsichtigen Spiegeln erreichen kann. Dagegen kann diese Beleuchtung bei der Beobachtung mit Concavlinsen unter Umständen mit Vortheil angewendet werden.

Man stelle sich nämlich in *Fig. 96* den Spiegel *SS* vor als nicht durchbohrt und unbelegt, bestehend aus einer oder mehreren über einander gelegten Glasplatten. Es werde von jedem Lichtstrahl, der auf den Spiegel fällt, der Theil α durchgelassen, der Theil $(1-\alpha)$ zurückgeworfen. Ist *H* die normale Helligkeit der Netzhautstelle *a*, bei direct einfallendem Lichte, so giebt das von dem Spiegel reflectirte

Licht nur die Helligkeit $H\,(1-\alpha)$. Der Querschnitt des Strahlenbündels, welches von a ausgeht, ist, da wo es auf B fällt, jetzt

$$J\,\frac{(h-g)^2}{h^2}.$$

Da nur der Theil α des Lichts durch die Platten hindurchgeht, so wird die scheinbare Helligkeit für den Beobachter:

$$H\cdot\alpha(1-\alpha)\,\frac{J\cdot(h-g)^2}{R\cdot h^2}.$$

Dieser Ausdruck erreicht auch in diesem Falle ein Maximum, wenn α gleich $^1/_2$ ist, und wird

$$^1/_4 H\cdot\frac{J\cdot(h-g)^2}{R\cdot h^2},$$

so lange

$$R<\frac{J\,(h-g)^2}{h^2}.$$

Diese Bedingung wird bei normalen Augen in der Regel erfüllt sein, da die Pupille J des von einer grossen Lichtmenge getroffenen Auges A in der Regel enger sein wird als die Pupille R des Beobachters. Nur bei der künstlichen Erweiterung der Pupille J durch Atropin wird es nicht der Fall sein, und dann wird die scheinbare Helligkeit einfach gleich $^1/_4 H$. Im letzteren Falle ist die Beobachtung mit einem durchbohrten Spiegel vortheilhafter, denn dort gilt der gegebene Ausdruck für die Helligkeit so lange

$$R<\alpha\cdot\frac{J\,(h-g)^2}{h^2}\quad\text{und}$$

$$\alpha={}^1/_2.$$

Wenn man normale Augen ohne Anwendung von Atropin untersucht, so würde man mittels beider Arten der Beleuchtung dieselbe Helligkeit erhalten können, wenn die Pupillen unbeweglich wären. Der belegte Spiegel wirft aber im Ganzen mehr Licht in das beobachtete Auge, blendet es stärker, und die Pupille verengt sich mehr, so dass unter diesen Umständen der unbelegte Spiegel ein grösseres Gesichtsfeld und eine grössere Helligkeit geben kann. Ausserdem beleuchtet er die gesehene Netzhautfläche gleichmässig, während beim durchbohrten Spiegel das Zerstreuungsbild der Durchbohrung die Beleuchtung ungleichmässig macht. Endlich ist der Hornhautreflex bei dem unbelegten Spiegel weniger störend, weil das vom Spiegel reflectirte Licht mehr oder weniger polarisirt ist, und von der Hornhaut ohne Aenderung seiner Polarisation zurückgeworfen nur zu einem sehr kleinen Theile durch die Platten zurückgeht.

Damit der unbelegte Spiegel die Hälfte des auffallenden Lichts zurückwerfe, kann man ihn entweder aus einer Glasplatte bestehen lassen, oder aus mehreren übereinandergelegten, muss aber den Einfallswinkel der reflectirten Lichtstrahlen dann passend wählen. Der passende Einfallswinkel für

eine Platte ist 70°
drei Platten „ 60°
vier Platten „ 56°.

Formen der Augenspiegel.

1) Augenspiegel von Helmholtz, mit reflectirenden Glasplatten und Concavlinsen. Es ist dieser Augenspiegel auf *Taf. III. Fig. 1* im Querschnitt und natürlicher Grösse, ebenda *Fig. 2* von vorn gesehen in halber Grösse dargestellt, mit einer Modification der ursprünglichen

Form, welche von dem Mechanikus Rekoss angebracht ist, nämlich mit zwei beweglichen Scheiben, welche die nöthigen Concavlinsen enthalten. Die drei reflectirenden Glasplatten sind mit *a a* bezeichnet, sie bilden die nach vorn gekehrte Hypotenusenfläche eines prismatischen Kastens, dessen Grundfläche ein rechtwinkeliges Dreieck ist, wie man im Querschnitte *Fig. 1* sieht. Die übrigen Flächen dieses hohlen Prismas sind aus Metallplatten gebildet und, um das Licht möglichst vollständig zu absorbiren, innen mit schwarzem Sammet ausgelegt. Die kleinere Kathetenfläche des Prismas ist an dem Gestell des Augenspiegels so befestigt, dass sie sich um die optische Axe des Instruments drehen kann, und hat dieser Axe entsprechend eine Oeffnung. Die Glasplatten werden durch einen rechtwinkeligen Rahmen an dem prismatischen Kasten zurückgehalten; der Rahmen selbst ist durch zwei Schrauben *e e* an die dreiseitigen Grundflächen des Prismas befestigt. Die Glasplatten bilden einen Winkel von 56° mit der optischen Axe des Instruments.

In das metallene Gestell des Instruments *g g* ist ferner eine Axe *d d* eingelassen, um welche sich zwei Scheiben *b b* und *c c* drehen. Jede dieser Scheiben hat fünf Oeffnungen. In je vieren sind Concavgläser von 6 bis 13 Zoll Brennweite eingesetzt, die fünfte ist leer. Diese Oeffnungen können nach einander in die optische Axe des Instruments gebracht werden, so dass der Beobachter, welcher sein Auge an das beckenförmige Ocularstück *B* anlegt, durch sie und die Glasplatten *a a* hindurchsieht. In *Fig. 1* ist die leere Oeffnung der Scheibe *b b* und eine mit einer Linse versehene der Scheibe *c c* vorgeschoben. So kann der Beobachter eine beliebige von den acht Linsen oder zwei von ihnen gleichzeitig vor sein Auge bringen. Damit die Scheiben ihre Stellung nicht ohne Willen des Beobachters verändern, sind an ihrem Rande Grübchen angebracht, in welche sich die Enden zweier Federn *h* einlegen.

Für Beobachtungen mit Concavgläsern, also bei starker Vergrösserung, an Personen, deren Pupille nicht künstlich erweitert ist, und bei grosser Empfindlichkeit des beobachteten Auges gegen Licht, finde ich unter den beweglichen Spiegeln diese erste Form des Augenspiegels aus den Gründen, welche ich oben bei der Theorie der Beleuchtung durch unbelegte Glasplatten angeführt habe, noch immer am vortheilhaftesten. Wenn ein gesundes Auge durch diesen Spiegel beobachtet wird, kann es die Erleuchtung Stunden lang, ohne geblendet zu werden, ertragen. Ich selbst habe oft 20 Studirenden hinter einander meine Netzhaut mit diesem Instrumente ohne Unbequemlichkeit gezeigt, während die Beleuchtung mit belegten Spiegeln nicht 5 Minuten ohne starke Blendung des Auges ertragen wird. Ich ziehe deshalb diesen Spiegel zu den meisten physiologischen Versuchen den anderen Formen vor. Für die augenärztlichen Untersuchungen dagegen wird ein grösseres Gesichtsfeld und grössere Helligkeit bei geringerer Vergrösserung meist vortheilhafter sein, und deshalb werden für dergleichen Beobachtungen meist belegte durchbohrte Spiegel mit Convexlinsen angewendet.

Will man den Spiegel gebrauchen, so setzt sich der Beobachter dicht vor den Beobachteten, und stellt an seiner Seite eine hell brennende Lampe auf. Ein undurchsichtiger Schirm wird so aufgestellt, dass er das Gesicht des Beobachteten beschattet. Der Beobachter bringt zuerst den Spiegel, ohne hindurchzusehen, ungefähr in die richtige Stellung vor das Gesicht des Beobachteten, und dreht ihn so, dass die Glasplatten ihren hellen Reflex auf das zu beobachtende Auge werfen. Dann blickt er hindurch und erblickt nun die Netzhaut roth erleuchtet. Wenn er nicht sogleich sein Auge für die feineren Theile der Netzhaut accommodiren kann, dreht er mit dem Zeigefinger der Hand, welche das Instrument hält, eine der Scheiben, welche die Linsen enthält, bis er die passende Concavlinse gefunden hat.

Wenn die Beleuchtung der Netzhaut verschwindet, achte man nur auf den hellen Reflex der Glasplatten im Gesichte des Beobachteten und führe diesen wieder auf das Auge zurück.

2) Augenspiegel von Ruete, mit durchbohrtem Concavspiegel, auf Stativ dargestellt in *Fig. 97*. Auf einem runden Fusse von Holz ruht eine hohle Säule *a*, in deren Axenkanale sich ein runder Stab *b* von Holz befindet, der hoch und niedrig geschoben und durch eine Feder, die sich am unteren Ende desselben befindet, in jeder beliebigen Höhe festgestellt werden kann. Auf diesem Stabe sitzt ein Halbkreis von Messing *c*, der sich mit dem Stabe hoch und niedrig, rechts und links stellen lässt. In diesem Halbkreise ist ein in der Mitte durchbohrter Hohlspiegel *d* von etwa 3 Par. Zoll Durchmesser und von einer Brennweite von

etwa 10 Par. Zoll durch Schrauben, die je nach dem Bedürfnisse gelüftet oder stärker angezogen werden können, so befestigt, dass er um seine Horizontalaxe gedreht werden kann. In der Mitte der Säule *a* befinden sich zwei hölzerne Ringe *e* und *f*, welche sich um die Säule drehen lassen. Jeder Ring trägt einen horizontal auslaufenden Arm *g* und *h*; der Arm *g* trägt einen geschwärzten Schirm, der einestheils dazu dient, um das Licht der Lampe vom Beobachter abzuhalten, anderentheils auch dazu, um, wenn es nöthig ist, das vom Spiegel in das beobachtete Auge fallende Licht abzuschwächen, was man dadurch bewirkt, dass man einen Theil des Spiegels durch den Schirm beschattet. Der Arm *h*, welcher in 12 Zolle eingetheilt ist, trägt zwei verticale Säulen, *i* und *k*, die rück- und vorwärts geschoben werden können; in jeder verticalen Säule steckt ein am unteren Ende mit einer Feder versehener Stift von Messing *l* und *m*, den man auf- und abwärts schieben kann, und der durch die Feder in jeder Höhe, die man ihm giebt, festgehalten wird. Auf diese Stifte steckt man je nach den Umständen concave oder convexe Gläser, welche die aus dem beobachteten Auge zurückkehrenden Lichtstrahlen zu einem deutlichen Bilde für den Beobachter vereinigen. *A* ist der Beobachtete, *B* der Beobachter. Die Zeichnung ergiebt leicht das Uebrige.

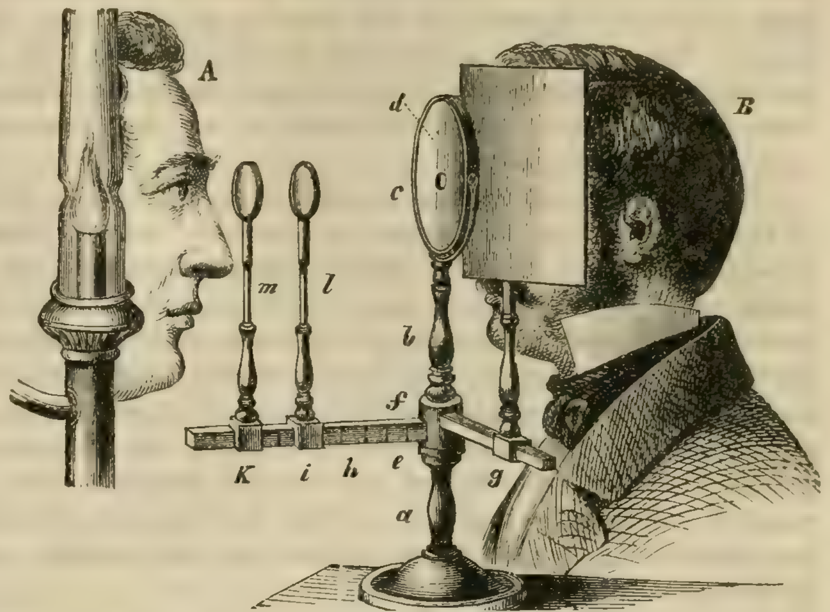


Fig. 97.

Für die Beobachtungen mit Concavlinsen, die in der augenärztlichen Praxis allerdings wohl eine seltenere Anwendung finden, ist das Instrument nicht gut geeignet, weil sich die beiden Augen nicht hinreichend nähern können, und deshalb das Gesichtsfeld sehr klein wird. Für Beobachtungen mit Convexlinsen dagegen, die in klinischen Localen angestellt werden, erscheint das Instrument sehr bequem, namentlich, wenn man durch einen Assistenten den Kopf des Beobachteten so dirigiren lässt, dass seine Pupille in den Focus der Lichtstrahlen kommt; auch kann durch Anbringung einer zweiten convexen Ocularlinse (die dann aber wohl besser hinter dem Spiegel anzubringen wäre) eine Art kleinen Fernrohrs zusammengesetzt und eine stärkere Vergrösserung erreicht werden. Die Helligkeit des Instruments ist sehr gross. Gelegenheit, die Netzhautbilder zu beobachten, ist nicht gegeben.

3) Epkens' Augenspiegel, mit durchbohrtem Planspiegel, auf Stativ, verändert durch Donders und van Trigt. Das ganze Instrument ist im Querschnitte dargestellt auf *Taf. III. Fig. 3* und in einer Seitenansicht *Fig. 4*. Der Spiegel *D*, einzeln abgebildet in *Fig. 5*, ist eine belegte Glasplatte, in deren Mitte der Beleg weggenommen ist, etwa in der Ausdehnung der Pupille; später hat Donders den Spiegel durchbohren lassen nach dem Vorgange von Coccius, um zu vermeiden, dass das in das Auge des Beobachters fallende Licht durch Reflexion geschwächt würde. Der Spiegel ist in einem würfelförmigen Kasten *E E* drehbar befestigt. Gedreht wird er mittels des Knopfes *F*. Das zu beobachtende Auge wird an die Oeffnung des Kastens bei *N* angelegt, das des Beobachters bei *O*. Hier befindet sich eine solche Scheibe mit verschiedenen Linsen, wie die von Rekoss bei dem Augenspiegel von Helmholtz angebrachte. Donders wählt dazu drei positive mit 20, 8 und 4 Cm. Brennweite, und drei negative mit 16, 10 und 6 Cm.

Mit dem kubischen Kasten hatte Epkens eine konische Röhre verbunden, an deren Ende, wo jetzt das Mikrometer *M* sich befindet, eine Lampe angebracht war. An das Ende der

Röhre kann, wenn es nöthig scheint, eine positive Linse gebracht werden, deren Brennpunkt wenig von der Flamme entfernt ist, so dass Jemandem, der in den Spiegel hineinsieht, die ganze Glaslinse leuchtend erscheint, und dadurch ein grösserer Theil der Netzhaut beleuchtet wird. Der ganze Apparat, an dem Stabe *A* befestigt, kann an diesem auf und ab bewegt werden. Bei *K* ist eine kreisförmige Scheibe befestigt, mit schwarzem Zeug bezogen, um das überflüssige Lampenlicht abzuhalten, und am unteren Theile des Instruments ist ein Stück Wachstafft *L L* aufgehängt an der Stange *Z*, um das Gesicht des Beobachters von dem des Beobachteten zu trennen.

Da es aber schwierig war, kranke Personen immer zu richtigen Bewegungen ihres Auges zu bestimmen, wurde der Apparat von Donders und van Trigt noch beweglicher gemacht. Es wurde die Röhre in einem Ringe *C* drehbar gemacht; der Würfel *E E* kann um die Axe, welche durch die Schrauben *b* und *c* bestimmt wird, gedreht werden. Die Lampe wurde vom Instrumente getrennt. Am Ende der Röhre *G* wurde ein Mikrometer angebracht. Die Spitzen des Mikrometers *a* und *b* werden im beobachteten Auge abgebildet, wenn dieses richtig accommodirt ist. Deshalb wurde das Mikrometer verschiebbar gemacht, vermittelst der Röhre *G*, welche sich auf der Röhre *B* verschiebt. *V* ist die Mikrometerschraube, durch deren Umdrehung der Abstand der Spitzen geändert und gemessen wird. Ist n der Abstand der Spitzen a und b, x ihre Entfernung vom vorderen Knotenpunkte des beobachteten Auges, und 15 Mm. der Abstand des hinteren Knotenpunktes von der Netzhaut, so ist der Abstand der Spitzen im Retinalbildchen y

$$y = \frac{n}{x} \times 15 \text{ Mm.}$$

Wenn man nun einen Zeichenapparat, wie man ihn bei Mikroskopen gebraucht, an der Oeffnung *O* anbringt, und sowohl den Abstand der Spitzen als die Gefässe u. s. w. der Netzhaut nachzeichnet, kann man die wahre Grösse der Gefässe und anderer Netzhauttheilchen bestimmen.

Später hat Donders noch für sehr kurzsichtige Augen ein zweites Mikrometer hinzugefügt, welches in die Röhre *B* eingeschoben wird. Ausserdem hat er für die Beobachtung von Augen, deren Pupille durch Belladonna erweitert ist, für das Ende der Röhre *B* eine kegelförmige Erweiterung mit einer Sammellinse von grösserer Apertur, als *J* hat, hinzugefügt, um ein grösseres Feld im Auge zu beleuchten.

Dieser Spiegel ist namentlich für Untersuchung der Netzhaut mit Concavgläsern bestimmt. Er lässt sehr genaue und sichere Untersuchungen und Messungen der Netzhautbilder und der kleineren Theile des Augenhintergrundes zu, und ist leicht und bequem zu gebrauchen. Aehnlich construirt ist der tragbare Augenspiegel von Saemann. Man denke sich die Röhre des Spiegels von Epkens bis zu einem blossen Ansatzstücke des Würfels verkürzt und das feste Gestell entfernt, statt der Scheibe, welche die Linsen enthält, eine Fassung, in welche die Linsen einzeln eingelegt werden, so hat man Saemann's Augenspiegel.

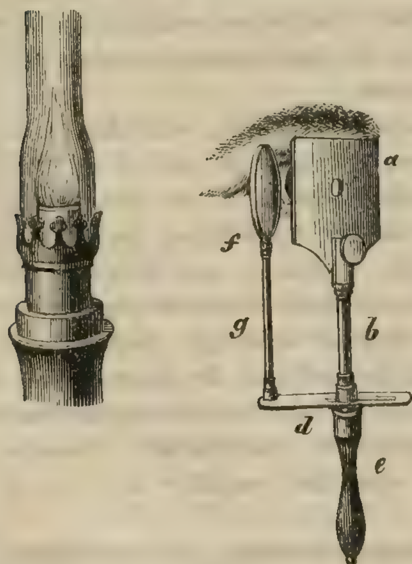


Fig. 98.

4) Portativer Augenspiegel von Coccius, mit durchbohrtem, belegtem, ebenem Spiegel und einer Beleuchtungslinse. Abgebildet in *Fig. 98*. Das Instrument besteht aus einem kleinen viereckigen Planspiegel *a* von 14 Par. Lin. Seite. Die Oeffnung hat 2 Par. Lin. Durchmesser, und ihr vorderer, dem beobachteten Auge zugekehrter Rand ist etwas abgeschliffen. Der Spiegel ist in eine dünne Messingplatte gefasst, welche an ihrem unteren Ende in einen kleinen Fortsatz übergeht, der an der Stange *b* befestigt ist. Die Beleuchtungslinse hat 5 Zoll Brennweite; um sie aber auch mit anderen vertauschen zu können, ist sie in einen geschlitzten federnden Ring *f* eingesetzt, von der Stange *g* und dem geschlitzten Querbalken *d* getragen. Der letztere

wird durch festes Anschrauben des Griffes *e* festgeklemmt, um die Stellung der Linse gegen den Spiegel zu sichern, welche man gewählt hat. Auseinander genommen kann das Instrument in ein kleines Etui gelegt werden.

Coccius bringt, wie Ruete, die Concavgläser wie die Convexgläser zwischen Spiegel und Licht an. Da das Erstere wegen der Reflexe unvortheilhaft ist, hat man später mehrere Hohlgläser in einem Schieberchen oder einzeln in Ringen an der Rückseite des Spiegels angebracht.

Wegen seiner Beweglichkeit ist dieser Spiegel für ärztliche Zwecke sehr brauchbar; man kann sowohl wie bei Ruete's Spiegel mit Convexlinsen, als auch wie bei Epkens' Spiegel mit Concavlinsen bequem untersuchen.

5) Portativer Spiegel von Zehender, mit durchbohrtem convexen Metallspiegel und Beleuchtungslinse, mit ähnlicher Fassung, wie der von Coccius. Im Wesentlichen unterscheidet sich das Instrument von dem letzteren nur dadurch, dass statt des ebenen Glasspiegels ein convexer Metallspiegel von 6 Zoll Radius angebracht ist. Indem man die convexe Linse dem convexen Spiegel näher oder ferner stellt, erhält man ein reflectirendes System von veränderlicher Brennweite, was man den Umständen anpassen kann. Ein wesentlicher Vortheil scheint mir noch in dem Umstande zu liegen, dass der Spiegel von Metall gefertigt ist, und daher der Rand des Schlochs dünn, gut geschwärzt und ohne Licht reflectirende Unebenheiten ist. Vorher habe ich nachgewiesen, dass bei den Beobachtungen mit dem durchbohrten Spiegel und der Concavlinse zur Erlangung der grössten Helligkeit nur die Hälfte des von einem Punkte der Netzhaut ausgehenden Strahlenbündels in das Auge des Beobachters fallen darf, falls nicht die Pupille des beobachteten Auges den mehr als doppelten Flächeninhalt von der des Beobachters hat. Der Beobachter wird daher in der Regel sich einen Theil seiner Pupille mit dem Rande der Oeffnung des Spiegels verdecken müssen, und einen Theil dieses Randes gerade vor dem Auge haben. Es ist daher vortheilhaft, an diesem Rande Alles zu vermeiden, was Licht reflectiren könnte, und das ist bei Zehender's Metallspiegeln viel besser erreicht als bei Coccius' Glasspiegeln.

6) Prismenspiegel von Meyerstein. Statt der metallischen Spiegel dient hierbei ein rechtwinkeliges Prisma, dessen Hypotenusenfläche das Licht zurückwirft. Der Beobachter sieht durch eine Durchbohrung des Prismas.

Später hat Meyerstein mit dem durchbohrten Prisma eine Beleuchtungslinse verbunden, und zwischen dem Auge des Beobachters und dem Prisma ein kleines Fernrohr angebracht, endlich der grösseren Wohlfeilheit wegen das Prisma durch einen durchbohrten Spiegel ersetzt; auch glaube ich, dass die Anwendung des Prismas eher Nachtheile als irgend einen Vortheil mit sich brachte. Das Ganze hat eine Fassung, mittels deren man es auf den Augenhöhlenrand des Beobachteten aufsetzen kann, und durch einen Arm mit zwei Gelenken ist auch ein Wachskerzchen mit dem Apparate verbunden, welches zur Beleuchtung dient.

Da das äussere Licht von dem beobachteten Auge ganz abgeschlossen wird, soll es auch in einem hellen Zimmer gebraucht werden können. Dadurch, dass man das Ocularglas des kleinen Fernrohrs heraus- oder hereinschiebt, kann man das optische System für Augen von jeder Sehweite passend machen.

7) Augenspiegel von Ulrich. Die wesentlichen Theile von Ruete's Augenspiegel sind in einer portativen Röhre angebracht, welche seitlich auch ein Licht zur Beleuchtung trägt.

Von den Beobachtungen, welche mit dem Augenspiegel an normalen Augen anzustellen sind, erwähne ich Folgendes. Der Grund des Auges erscheint bei starker Beleuchtung (mit belegten Spiegeln und Convexlinsen) roth, nur die Eintrittsstelle des Sehnerven zeichnet sich hellweiss ab. Man sieht auf dem rothen Grunde zunächst die Netzhautgefässe verlaufen, deren Stämme aus der Mitte des weissen Sehnerven hervortreten. Die Arterien sind durch ihre lichtere rothe Farbe und durch einen stärkeren Lichtreflex an ihrer Oberfläche zu erkennen. Zwischen den Netzhautgefässen erscheint der Grund des Auges je nach der Menge des Pigments bald hellroth, bald braun, und man erkennt, namentlich an den mehr zur Seite gelegenen Theilen, sehr häufig die Gefässe der Aderhaut, wie es in *Fig. 99* dargestellt ist. Man sieht daselbst

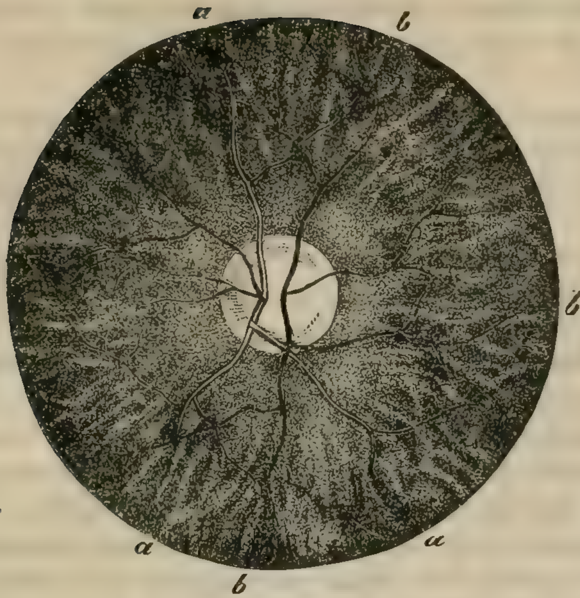


Fig. 99.

in der Mitte die Eintrittsstelle des Sehnerven; *a a a* sind Aeste der Netzhautarterie, *b b b* der Netzhautvene, dazwischen sieht man die viel weiteren Gefässe der Aderhaut. Letztere sind nicht immer gleich deutlich; in den meisten Augen ist die Pigmentschicht über diesen Gefässen so dünn, dass sie sich dadurch von den stärker pigmentirten Zwischenräumen abheben.

Bei starker Beleuchtung zeigt der Augengrund keine auffallenden Unterschiede in der Helligkeit, mit Ausnahme der Eintrittsstelle des Sehnerven. Es scheint, dass dabei verhältnissmässig viel Licht durch die Pigmentschicht der Aderhaut dringt, von der Sclerotica reflectirt wird und wieder zurückkehrt. Dass bei den meisten Augen ziemlich viel Licht durch die Augenhäute dringen kann, zeigt uns der Versuch (§. 10, S. 65), bei welchem das Netzhautbildchen im inneren Augenwinkel sichtbar wird, und ferner die entoptische Erscheinung der Aderfigur der Netzhaut mittels Lichts, welches die Sclerotica durchdringt. Dieser Theil des zurückkehrenden Lichts, welcher von der Reflexion in der Aderhaut und Sehnenhaut herrührt, bleibt nun wohl ziemlich gleich auf allen Stellen des Augengrundes, auch wenn die Helligkeit der Netzhaut sehr variirt.

Bei schwacher Beleuchtung (mit reflectirenden Glasplatten) erscheinen dagegen die Theile des Augengrundes in der Nähe des Sehnerven besonders hell, und die Helligkeit nimmt von hier aus im Allgemeinen nach den Rändern der Netzhaut hin gleichmässig ab, nur die Stelle des directen Sehens zeichnet sich besonders durch geringe Helligkeit und eine mehr gelbliche Farbe vor ihrer Nachbarschaft aus, was bei der stärkeren Beleuchtung nicht der Fall ist. Der Grund davon ist wohl darin zu suchen, dass bei schwacher Beleuchtung nicht merklich viel Licht durch die Pigmentschicht hin und zurück geht, daher der wahrnehmbare Lichtreflex hauptsächlich von den Theilen der Netzhaut, namentlich ihren Gefässen herrührt. Diese fehlen an der Stelle des directen Sehens.

Die letztere Stelle zeigt bei beiden Beobachtungsweisen ein kleines lichtes Fleckchen von querovaler Form, welches Coccius, der es zunächst bemerkte, als den Reflex der Netzhautgrube bezeichnet, während Donders später direct nachwies, dass dieser kleine Lichtreflex die Stelle des directen Sehens einnimmt.

Man muss zu diesem Versuche einen ebenen Spiegel anwenden, hinter welchem eine Concavlinse steht (Donders-Epkens oder Helmholtz). Als Gesichtsobject benutze man eine Lichtflamme oder das Mikrometer an Donders' Instrumente. Das beobachtete Auge sieht das gewählte Object im Spiegelbilde; man sorge, dass es sich gehörig dafür accommodiren könne, und lasse es einen bestimmten Punkt des Objects fixiren. Der Beobachter erblickt dann ein ganz scharf gezeichnetes umgekehrtes Bild des Objects auf der Netzhaut des beobachteten Auges und an der direct fixirten Stelle den Reflex der Netzhautgrube. Sollte dieser zu schwach sein, um von Anfang her wahrgenommen zu werden, so geschieht dies leichter, wenn der Beobachter den Beobachteten bald auf diesen, bald auf jenen Theil des Gesichtsobjects seinen Blick zu richten heisst. Der kleine Reflex wandert dann dem entsprechend auf dem Netzhautbilde umher.

Um die Genauigkeit des Netzhautbildes zu prüfen, ist das von Donders an dem Augenspiegel von Epkens angebrachte Mikrometer zweckmässig zu gebrauchen. Für meinen Spiegel wähle ich zu dem gleichen Zwecke als Gesichtsobject einen vor einem Lichte in horizontaler Richtung ausgespannten Faden. Von verticalen feinen Linien giebt mein Instrument nämlich wegen der mehrfachen reflectirenden Flächen mehrfache Bilder. Sobald das beobachtete Auge

sich scharf für das betreffende Object accommodirt, erscheint es auch im Netzhautbilde ganz scharf. Sowie sich die Accommodation ändert, wird es verwaschen, Uebrigens braucht man gar nicht so feine Objecte, um die Veränderung des Bildes bei der Accommodation zu sehen. Es genügt, wenn das beobachtete Auge nicht kurzsichtig ist, in der Ferne ein Licht aufzustellen, dessen Netzhautbild im beobachteten Auge man betrachtet, während dieses Auge abwechselnd nach einem fernen oder nahen Gesichtspunkte, die in gleicher Richtung liegen, hinblickt. Bei der Accommodation für die Ferne erscheint auch das Bild des fernen Lichts deutlich. Bei der Accommodation für die Nähe wird es verwaschen. Meistens verschwinden dem Beobachter dabei auch die Netzhauttheile des beobachteten Auges, wenn er mit der Accommodation seines Auges der neuen Lage des Bildes nicht folgen kann, und er muss dann ein anderes Concavglas gebrauchen, um sich zu überzeugen, dass auf der deutlich gesehenen Netzhaut des beobachteten Auges ein undeutliches Bild des fernen Lichts entworfen sei. Der Versuch kann auch so abgeändert werden, dass das beobachtete Auge fortdauernd in die Ferne sieht, das Licht aber in die Nähe gebracht wird, damit sich der Beobachter überzeuge, dass von dem nahen Lichte ein undeutliches Bild entworfen werde.

Das Augenleuchten ist seit ältester Zeit bekannt an den Augen von Hunden, Katzen und anderen Thieren, welche im Hintergrunde ihres Auges ein Tapetum, d. h. eine pigmentlose, mit stark reflectirenden dünnen Fasern oder Lamellen belegte Stelle haben. Bei diesen ist der Lichtreflex so stark, dass er unter einigermassen günstigen Umständen leicht gesehen wird. Eine sehr allgemein verbreitete alte Meinung war es, dass die sogenannten leuchtenden Thieraugen Licht entwickeln sollten, namentlich wenn die Thiere gereizt würden, daher man denn geneigt war, diese angeblich vorhandene Lichtentwickelung dem Einflusse des Nervensystems zuzuschreiben. Man sieht das Leuchten der Thieraugen in dunklen Räumen am auffallendsten, wenn Licht von der Rückseite des Beobachters dicht neben seinem Kopfe vorbei in das Auge des Thieres fällt, und eben deshalb konnte den Beobachtern oft das wirklich einfallende Licht verborgen bleiben. Ebenso sollten die pigmentlosen Augen weisser Kaninchen und albinotischer Menschen durch eigene Lichtentwickelung leuchten. Prevost [1] zeigte zuerst, dass das sogenannte Leuchten der Thieraugen niemals in vollkommener Dunkelheit und weder willkürlich noch durch Affecte hervorgebracht wird, sondern stets nur durch Reflexion von einfallendem Lichte entstehen kann. Gruithuisen [2] hat unabhängig hiervon dasselbe gefunden; er weist nach, dass das Tapetum daran Schuld sei, verbunden mit einer „ausserordentlichen Brechung“ der Linse. Auch in den Augen todter Thiere sah er das Leuchten. Diese Thatsachen bestätigten Rudolphi [3], J. Müller [4], Esser [5], Tiedemann [5], Hassenstein [7]. Rudolphi machte darauf aufmerksam, dass man in einer bestimmten Richtung in das Auge sehen müsse, um das Leuchten wahrzunehmen, Esser erklärt richtig den Wechsel der Farbe daraus, dass verschieden gefärbte Theile der Netzhaut durch die Pupille erblickt würden, Hassenstein endlich findet, dass das Leuchten hervortritt, wenn die Augen in Richtung ihrer Axe comprimirt werden, und vermuthete, dass auch beim lebenden Thiere das Leuchten willkürlich erregt werde, indem durch den Druck der Muskeln die Augenaxe verkürzt werde. Man erkannte also das Leuchten als ein Reflexphänomen an, ohne sich aber klar zu machen, von welchen Bedingungen das Leuchten oder Nichtleuchten abhinge.

An menschlichen Augen war das Leuchten früher nur bei seltenen Krankheitszuständen beobachtet worden, namentlich bei Geschwülsten im Hintergrunde des Auges. Auch bei Mangel der Iris hat Behr [8] es gesehen und gefunden, dass die Augen des Beobachters fast ganz parallel mit den einfallenden Strahlen nach den Augen der Kranken blicken mussten, welches die Grundbedingung von Brücke's Methode, das Augenleuchten zu beobachten, ist. Das Leuchten ist in solchen Fällen von Irismangel auffallender, weil die Beleuchtung der Netzhaut viel stärker ist; ausserdem fehlt die Accommodationsfähigkeit des Auges.

Endlich fanden W. Cumming [9] und Brücke [10] unabhängig von einander das Verfahren,

---

[1] *Biblioth. Britannique.* 1810. T. 45.
[2] Beiträge zur Physiognosie und Eautognosie. S. 199.
[3] Lehrbuch der Physiologie. I. 197.
[4] Zur vergleichenden Physiologie d. Gesichtssinns. Leipzig 1826. S. 49. — Handbuch d. Physiologie. 4. Aufl. I. 89.
[5] Kastner's Archiv für die gesammte Naturlehre, Bd. VIII. S. 399.
[6] Lehrbuch der Physiologie. S. 509.
[7] De luce ex quorundam animalium oculis prodeunte atque de tapeto lucido. Jenae 1836.
[8] Hecker's Annalen. 1839. I. S. 373.
[9] *Medico-chirurgical Transactions.* XXIX. p. 284.
[10] J. Müller's Archiv für Anat. u. Physiologie. 1847. S. 225.

gesunde menschliche Augen leuchtend erscheinen zu machen, indem der Beobachter den einfallenden Lichtstrahlen nahe parallel hineinblickt. Letzterer hatte dieselbe Methode schon vorher auf die mit einem Tapetum versehenen Thieraugen angewendet. Endlich erwähnt WHARTON JONES [1], dass BABBAGE ungefähr zu derselben Zeit ihm einen belegten Glasspiegel gezeigt habe, von dessen Belegung eine kleine Stelle weggenommen war, um Licht in das Auge zu werfen und durch die Oeffnung hineinzusehen. Dies erinnert schon sehr an den Augenspiegel von COCCIUS; aber da BABBAGE keine Linse mit seinem Spiegel verbunden zu haben scheint, so hat er höchstens ausnahmsweise von den Theilen der Netzhaut etwas erkennen können, und hat deshalb wohl seine Erfindung damals nicht veröffentlicht.

Die andere Seite der Frage, warum nämlich die Theile der Netzhaut, auch wenn sie beleuchtet sind, z. B. in Thieraugen mit Tapetum, in Augen von Albinos, dem Beobachter nicht erkennbar sind, ist öfter besprochen worden. Ihre Lösung lag mehr auf der Hand. Schon im Anfange des 18. Jahrhunderts hatte MÉRY [2] beobachtet, dass er bei einer Katze, die er unter Wasser getaucht hatte, in den Augen, welche stark leuchtend erschienen, die Netzhautgefässe erkennen konnte. LA HIRE [3] gab von diesem letzteren Umstande die richtige Erklärung. Dass eine veränderte Brechung der Strahlen nothwendig sei, um das Auge leuchtend erscheinen zu machen, sah er ein, aber eine nähere Erklärung weiss er nicht zu geben. Ebenso KUSSMAUL [4]. Letzterer zeigt, dass die Netzhaut hell und erkennbar werde, wenn man entweder vorn vom Auge die Hornhaut und Linse entfernt, oder etwas vom Glaskörper herausnimmt und dadurch die Augenaxe verkürzt,

Ich selbst [5] bin, so viel ich finde, der Erste gewesen, welcher sich den Zusammenhang zwischen den Richtungen der einfallenden und ausgehenden Strahlen klar machte, den wahren Grund für die Schwärze der Pupille und dadurch auch das Princip für die Construction der Augenspiegel fand. Zur Beleuchtung wendete ich ebene unbelegte Glasplatten an, zur Erkennung der Netzhaut Concavgläser. TH. RUETE war dagegen der Erste, welcher einen durchbohrten Spiegel anwandte, und die Beobachtung durch Convexlinsen. Da das neue Instrument in kurzer Zeit eine ausserordentliche Wichtigkeit in der Augenheilkunde erreichte, sind nachher noch eine grosse Zahl verschiedener Formen von Augenspiegeln construirt worden, von denen ich oben die wichtigsten aufgeführt habe. Wesentlich neue Principien für die Erleuchtung oder Erkennung der Netzhaut sind dabei aber nicht mehr gefunden worden.

Die von mir aufgestellte Theorie des Augenleuchtens und der Augenspiegel hat keine wesentlichen Veränderungen erfahren. Die Verbesserungen, welche STELLWAG VON CARION daran anzubringen gesucht hat, kann ich nicht als solche anerkennen. Dieser übrigens um die Einführung physikalischer Kenntnisse in seine Wissenschaft eifrig bemühte Augenarzt ist bei den hierher gehörigen Arbeiten durch falsche Grundprincipien über die Stärke der Beleuchtung und Helligkeit durchaus irre geführt worden.

1704. MÉRY in *Annales de l'Académie des sciences.* 1704.
1709. LA HIRE ebenda. 1709.
1810. PREVOST in *Bibliothèque britannique.* XLV.
GRUITHUISEN Beiträge zur Physiognosie und Eautognosie. S. 199.
RUDOLPHI Physiologie. I. 197.
1826. J. MÜLLER zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig. S. 49.
ESSER in KASTNER's Archiv für die gesammte Naturlehre. VIII. 399.
1836. HASSENSTEIN de luce ex quorundam animalium oculis prodeunte atque de tapeto lucido. Jenae.
1839. BEHR in HECKER's Annalen. Bd. I. S. 373.
1844. E. BRÜCKE über die physiologische Bedeutung der stabförmigen Körperchen. J. MÜLLER's Archiv für Anatomie und Physiologie. 1844. S. 444*.
1845. E. BRÜCKE Anatomische Untersuchungen über die sogenannten leuchtenden Augen bei den Wirbelthieren. Ebenda. 1845. S. 387*.
KUSSMAUL Die Farbenerscheinungen im Grunde des menschlichen Auges. Heidelberg.
1846. W. CUMMING in *Medico-chirurgical Transactions.* XXIX. 284.
1847. E. BRÜCKE Ueber das Leuchten der menschlichen Augen, in J. MÜLLER's Archiv. 1847. S. 225* u. 479*.

---

1 *Archives générales de Médecine.* 1854. II.
2 *Annales de l'Acad. d. sc.* 1704.
3 Ebenda. 1709.
4 Die Farbenerscheinungen im Grunde des menschlichen Auges. Heidelberg 1845.
5 H. HELMHOLTZ Beschreibung eines Augenspiegels zur Beobachtung der Netzhaut im lebenden Auge. Berlin 1851. — Ferner in VIERORDT's Archiv für physiol. Heilkunde. II. 827.

1851. H. Helmholtz Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge. Berlin.
1852. Th. Ruete Der Augenspiegel und das Optometer. Göttingen.
H. Helmholtz über eine neue einfachste Form des Augenspiegels, in Vierordt's Archiv für physiologische Heilkunde. II. 827.
Follin in *Archives générales de Médecine.* 1852. Juli.
A. Coccius über die Ernährungsweise der Hornhaut. Leipzig.
Froebelius Medic. Zeitung Russlands. 1852. Nr. 46.
1853. A. Coccius über die Anwendung des Augenspiegels nebst Angabe eines neuen Instruments. Leipzig*.
A. C. van Trigt Dissertatio de Speculo oculi. Utrecht; Nederlandsch Lancet. Ser. 3. Dl. II. 430. Deutsch mit Zusätzen von Schauenburg. Lahr 1854.
H. A. O. Saemann de speculo oculi. Regiomonti.
R. Ulrich Beschreibung eines neuen Augenspiegels, in Henle u. Pfeuffer Zeitschrift für rationelle Medicin. Neue Folge. IV. 175*.
Meyerstein Beschreibung eines neuen Augenspiegels. Ebenda. S. 310.
Follin et Nachet *Mém. de la Société de Chirurgie.* 1853. III.
Spencer Wells *Medical Times.* 1853. Septb.
1854. Donders Verbeteringen van den Oogspiegel, in Onderzoekingen gedaan in het Physiologisch Laboratorium der Utrecht'sche Hoogeschool. Jaar VI. bl. 131* u. 153*.
Anagnostakis *Essay sur l'exploration de la rétine et des milieux de l'oeil sur le vivant un moyen d'un nouvel ophthalmoscope.* Paris 1854. (Ein durchbohrter Hohlspiegel.) Auch in *Anales d'oculistique.* Février et Mars 1854.
Stellwag von Carion Theorie der Augenspiegel. Wien*.
G. A. Leonhard de variis oculorum speculis illorumque usu. Leipzig.
Th. Ruete Bildliche Darstellungen der Krankheiten des menschlichen Auges. Leipzig. Lieferung 1 u. 2 auch unter dem Titel: Physikalische Untersuchung des Auges. S. 23—37*.
W. Zehender Ueber die Beleuchtung des innern Auges mit specieller Berücksichtigung eines nach eigener Angabe construirten Augenspiegels, in Graefe Archiv für Ophthalmologie. I. 1. S. 121*.
1855. Liebreich ebenda. I. 2. S. 348.
Stellwag von Carion Zeitschrift der Aerzte zu Wien. XI. S. 65*.

Zweiter Abschnitt.

Die Lehre von den Gesichtsempfindungen.

§. 17. Von der Reizung des Sehnervenapparates.

Die Nervenapparate des menschlichen und thierischen Körpers werden durch Einwirkung äusserer Agentien verschiedener Art in einen veränderten Zustand versetzt, den man einerseits an ihnen durch physikalische Hülfsmittel, nämlich durch die Untersuchung ihrer elektromotorischen Wirksamkeit erkennen kann, und der sich andererseits durch Wirkungen zu erkennen giebt, welche die Nerven in anderen mit ihnen organisch verbundenen Theilen des Körpers hervorbringen. So verräth sich dieser veränderte Zustand einiger Nerven durch Zusammenziehungen der mit ihnen verbundenen Muskeln; diese werden motorische Nerven genannt. Andere erregen unter denselben Umständen Empfindungen in dem Gehirne, als dem körperlichen Organe des Bewusstseins, und heissen deshalb sensible Nerven. Bei den motorischen Nerven ist nun der auffälligste Erfolg der verschiedenartigsten äusseren Einwirkungen, des Zerrens, Quetschens, Zerschneidens, des Brennens, Anätzens, der elektrischen Durchströmungen, immer die Zusammenziehung des zugehörigen Muskels, welche nur quantitative Unter-

schiede der Stärke zeigt. Man fasst deshalb die genannten verschiedenartigen Einwirkungen in ihrem Verhältnisse zu den motorischen Nerven unter einen Namen, den der Reize, zusammen, indem man von ihren qualitativen Verschiedenheiten abstrahirt und sie nur nach der verschiedenen Stärke der Zuckungen, welche sie hervorbringen, quantitativ als stärker oder schwächer reizend von einander unterscheidet. Den veränderten Zustand im Nerven selbst, welcher in Folge der Einwirkung eines Reizes eintritt, nennt man die Reizung, und die Fähigkeit des Nerven, nach Einwirkung von Reizen Muskelzuckungen hervorzubringen, die Reizbarkeit. Diese Fähigkeit kann durch Absterben und mancherlei äussere Einwirkungen beeinträchtigt werden.

Bei den sensiblen Nerven lässt sich das Schema dieser Begriffe noch insofern wieder anwenden, als auch in ihnen die äusseren Einwirkungen, welche, auf einen motorischen Nerven angewendet, Zuckung hervorzubringen vermögen, wiederum alle eine andere Wirkung eigenthümlicher Art, nämlich eine Empfindung hervorrufen, so lange der Nerv noch nicht abgestorben und vom Gehirne getrennt ist. Aber allerdings tritt hier schon der wesentliche Unterschied ein, dass die Empfindung qualitative Unterschiede zeigt, entsprechend den qualitativen Unterschieden der Einwirkung. Indessen, wenn auch verschiedene Reize verschiedene Empfindungen hervorrufen, so sind die Wirkungen der Reize doch immer Empfindungen, also immer Wirkungen von einer sonst nicht vorkommenden, dem lebenden Körper eigenthümlichen Art, und eben deshalb hat man den zuerst für die Verhältnisse der motorischen Nerven abstrahirten Begriff der Reize und der Reizung auch auf die der sensiblen Nerven übertragen, und man nennt deshalb ebenso die äusseren Einwirkungen, welche auf lebende sensible Nerven angewendet die Entstehung von Empfindungen veranlassen, Reize, die im Nerven eingetretene Veränderung selbst die Reizung.

Der Zustand der Reizung, welcher an jeder Stelle einer Nervenfaser durch Einwirkung von Reizen eingeleitet werden kann, pflanzt sich stets auch auf alle anderen Theile der Nervenfaser fort, und giebt sich auch in diesen theils durch die veränderten elektromotorischen Wirkungen zu erkennen, theils durch seinen Einfluss auf die anderen organischen Gebilde, Muskeln, Gehirn, Drüsen u. s. w., mit denen der Nerv verbunden ist, indem Zusammenziehung des Muskels, oder Empfindung, oder vermehrte Absonderung der Drüse eintritt. Nur wo eingreifende Veränderungen der Structur des Nerven durch mechanische oder chemische Eingriffe, durch Gerinnung des Inhalts der Nervenfaser beim Absterben eingetreten sind, findet die Fortleitung der Reizung ein Hinderniss. Jeder Stelle einer unverletzten Nervenfaser kommt deshalb nicht blos Reizbarkeit, d. h. die Fähigkeit, in Reizung versetzt zu werden, sondern auch Leitungsfähigkeit für die Reizung zu. Eine Trennung beider Fähigkeiten ist noch nicht beobachtet worden. Uebrigens sind bisher noch keine Unterschiede in der Structur und Function der sensiblen und motorischen Fasern bekannt, welche nicht von ihrer verschiedenen Verbindung mit anderen organischen Systemen hergeleitet werden könnten. Die Fasern selbst scheinen nur die Rolle indifferenter leitender Fäden zu spielen, die, je nachdem sie mit einem Muskel oder mit empfindenden Gehirntheilen organisch verbunden sind, zu motorischen oder sensiblen Nerven werden.

Die Empfindungen des Menschen zerfallen ihrer Qualität nach in fünf Gruppen, welche den sogenannten fünf Sinnen entsprechen, in der Weise, dass nur die Qualitäten derjenigen Empfindungen unter einander vergleichbar sind, welche dem Qualitätenkreise desselben Sinnes, nicht aber solche, welche zwei verschiedenen Sinnen angehören. So können wir z. B. zwei verschiedene Empfindungen, die dem Gesichtssinne angehören, nach Lichtintensität und Farbe vergleichen, aber keine von ihnen mit einer Tonempfindung oder Geruchsempfindung.

Die physiologische Erfahrung hat, so weit Prüfung möglich war, gefunden, dass durch Reizung jeder einzelnen sensiblen Nervenfaser nur solche Empfindungen entstehen können, welche dem Qualitätenkreise eines einzigen bestimmten Sinnes angehören, und dass jeder Reiz, welcher diese Nervenfaser überhaupt zu erregen vermag, nur Empfindungen dieses besonderen Kreises hervorruft. Vollständig experimentell beweisen lässt sich der Satz nur für solche Nervenfasern, die in besonderen Nervenstämmen, getrennt von allen Fasern, die anderen Sinnen angehören, zusammenliegen, wie die des Gesichtssinnes im *Nervus opticus,* die des Gehörs im *Nervus acusticus,* die des Geruchs im *Nervus olfactorius,* die des Tastsinns in den hinteren Rückenmarkswurzeln. Lässt man auf diese Nervenstämme verschiedene Reizmittel einwirken, so entstehen zwar verschiedene Empfindungen, aber nur Empfindungen, die dem Qualitätenkreise des betreffenden Sinnes angehören. Für solche sensible Nervenfasern dagegen, die mit Fasern anderer Art in demselben Stamme verlaufen, wie die Geschmacksnerven mit Tastnerven der Zunge im *Nervus glossopharyngeus* und *lingualis* vereinigt sind, lässt sich dasselbe Verhältniss wenigstens daraus wahrscheinlich machen, dass in Krankheitszuständen zuweilen isolirt Lähmung der Geschmacksempfindungen allein ohne Lähmung der Tastempfindungen oder umgekehrt vorkommt, und auch daraus, dass alle anderen Tastnerven der Fähigkeit, Geschmacksempfindungen zu vermitteln, ermangeln.

Dem Kreise des Gesichtssinns gehören die Lichtempfindungen an, welche alle unter sich in Bezug auf Lichtstärke und Farbe vergleichbar sind. Denjenigen Theil der Nervenmasse des Körpers, durch dessen Reizung dergleichen Empfindungen entstehen können, nennen wir nach J. Müller die Sehsinnsubstanz, oder auch wohl den Sehnervenapparat. Dazu gehört die Netzhaut, der Sehnerv und ein noch nicht genau zu begrenzender Theil des Gehirns, in welchen die Wurzelfaserungen des Sehnerven eintreten. Kein anderer Nervenapparat des Körpers kann Lichtempfindung, d. h. eine Empfindung von derselben Qualität wie der Sehnervenapparat vermitteln, obgleich die leuchtenden Aetherschwingungen auch durch die Tastnerven wahrgenommen werden können, aber freilich in einer ganz anderen Empfindungsqualität, nämlich als Empfindung strahlender Wärme. Es findet hier dasselbe statt, wie bei den Luftschwingungen, welche der Hörnerv als Ton empfindet, während sie gleichzeitig in der Haut die Tastempfindung des Schwirrens erregen, dasselbe wie bei dem Essig, den die Zunge als sauer schmeckt, und der in einer entblössten Hautstelle oder auf einer zarten Schleimhaut, wie die Bindehaut des Auges ist, durch

eine Tastempfindung, nämlich durch schmerzhaftes Brennen, sich bemerklich macht.

Andererseits können nicht blos die leuchtenden Aetherschwingungen den Sehnervenapparat erregen, sondern auch mannigfache andere Reizmittel, namentlich mechanische Einwirkungen und elektrische Ströme, welche ja auch alle anderen Nervenapparate des Körpers in den Zustand von Reizung zu versetzen vermögen. Wenn aber diese Reize den Sehnerven oder die Netzhaut treffen, bringen sie immer nur Gesichtsempfindungen hervor, nicht Gehörs- oder Geruchsempfindungen, und wenn sie etwa gleichzeitig Tastempfindungen erregen, so müssen wir voraussetzen, dass dies geschieht, weil sich im Auge und vielleicht selbst in der Masse des Sehnerven, wie in allen inneren Theilen des Körpers, auch besondere Tastnerven verbreiten. Diese Tastempfindungen, welche durch Einwirkung von Druck oder Elektricität auf das Auge entstehen, unterscheiden sich übrigens noch dadurch von den gleichzeitig erregten Lichtempfindungen, dass jene am Orte der Reizung wahrgenommen werden, letztere dagegen von der Vorstellung als helle Objecte in das Gesichtsfeld verlegt werden. Wir kommen darauf bei der genaueren Beschreibung der mechanischen Reizung des Auges noch einmal zurück.

Da es sich mit den übrigen Sinnesnerven ebenso verhält, so geht daraus hervor, dass die Qualität der sinnlichen Empfindung hauptsächlich von der eigenthümlichen Beschaffenheit des Nervenapparats abhängt, erst in zweiter Linie von der Beschaffenheit des wahrgenommenen Objects. Zu dem Qualitätenkreise welches Sinnes die entstehende Empfindung gehört, hängt sogar gar nicht von dem äusseren Objecte, sondern ausschliesslich von der Art des getroffenen Nerven ab. Welche besondere Empfindung aus dem betreffenden Qualitätenkreise hervorgerufen wird, erst dies hängt auch von der Natur des äusseren Objectes ab, welches die Empfindung erregt. Ob uns die Sonnenstrahlen als Licht- oder Wärmestrahlung erscheinen, hängt nur davon ab, ob wir sie durch den Sehnerven oder durch die Hautnerven empfinden; ob sie aber als rothes oder blaues, schwaches oder starkes Licht, sengende oder milde Wärme erscheinen, hängt gleichzeitig von der Art der Strahlen, wie von dem Zustande des Nervenapparates ab. Die Qualität der Sinnesempfindung ist also keineswegs identisch mit der Qualität des Objects, durch welche sie hervorgerufen wird, sondern sie ist in physischer Beziehung nur eine Wirkung der äusseren Qualität auf einen besonderen Nervenapparat, und für unsere Vorstellungen ist die Qualität der Empfindung gleichsam nur ein Symbol, ein Erkennungszeichen für die objective Qualität.

Das erste und hauptsächlichste Reizmittel des Sehnerven ist das objective Licht. Ich nenne es das erste und hauptsächlichste, weil es bei weitem häufiger und anhaltender auf den Sehnerven einwirkt, als andere Reize, und weil demgemäss auch fast nur die durch objectives Licht hervorgerufenen Empfindungen des Sehnervenapparates zur Wahrnehmung äusserer Objecte verwendet werden. Eine besondere, specifische Beziehung oder Homogeneität zwischen dem objectiven Lichte und dem Nervenagens des Sehnerven, wie sie von älteren Philosophen und Physiologen meist vorausgesetzt wurde, brauchen wir deshalb nicht anzunehmen. Denn weder ist der Sehnerv der einzige Nerv, welcher durch

objectives Licht gereizt wird — auch die Hautnerven können es werden — noch ist das objective Licht das einzige Reizmittel des Sehnerven. Dass es das häufigste, und deshalb wichtigste ist, erklärt sich einfach aus der geschützten Lage des Sehnerven und der Netzhaut, die dem Lichte sehr leicht, mechanischen Eindrücken und elektrischen Strömungen viel schwerer zugänglich sind. Diese überwiegende Häufigkeit und Wichtigkeit der Reizung durch objectives Licht hat nun auch die Menschen bestimmt, denjenigen Theil der Aetherschwingungen, welcher Lichtempfindung zu erregen im Stande ist, mit dem Namen Licht zu belegen, welcher eigentlich nur der dadurch erregten Empfindung zukommen sollte. Man schied die Sonnenstrahlen in Sonnenlicht und Sonnenwärme, nach den beiden Empfindungsweisen, welche sie zu erregen im Stande sind. So lange die Menschen über die Natur ihrer Sinnesempfindungen nicht weiter nachgedacht hatten, mussten sie geneigt sein, die Empfindungsqualitäten unmittelbar auf die äusseren Dinge zu übertragen, und so in den Sonnenstrahlen zwei, den zwei Empfindungen entsprechende Objecte vorauszusetzen. Man wusste ausserdem zunächst über die Sonnenstrahlen weiter nichts, als was die Empfindung aussagte, und man beobachtete neben solchen Strahlungen, bei denen, wie in den Sonnenstrahlen, die schneller schwingenden Wellenzüge überwiegen, die das Auge viel stärker afficiren als die Haut, andere, in denen die langsameren Oscillationen überwiegen, und die die Haut kräftig, das Auge schwach oder gar nicht afficiren, so dass auch objectiv eine Trennung beider Agentien vorzukommen schien. Erst in der neuesten Zeit hat eine sorgfältige Untersuchung der von unseren Nervenapparaten unabhängigen Eigenschaften der leuchtenden und nicht leuchtenden Wärmestrahlen die Physiker überzeugt, dass zwischen ihnen kein anderer Unterschied als der der Schwingungsdauer besteht, und hat dadurch die Physik von dem Einflusse, den die Sinnesempfindungen in diesem Falle so lange unberechtigter Weise ausgeübt hatten, befreit. Die nähere Besprechung des objectiven Lichtes als Reizmittel der Netzhaut bleibt den nächstfolgenden Paragraphen vorbehalten.

Die Erscheinungen bei mechanischer Reizung des Sehnervenapparates sind nach der Ausdehnung der Reizung verschieden. Bei einem plötzlichen Schlag oder Stoss auf das Auge entsteht ein blitzähnlich erscheinender und wieder verschwindender, oft sehr heller Lichtschein über das ganze Gesichtsfeld hin. Aelteren irrthümlichen Ansichten dieser Erscheinung gegenüber mag hier hervorgehoben werden, dass, wenn dies im Dunkeln geschieht, ein anderer Beobachter dabei in dem Auge des Getroffenen keine Spur von objectivem Lichte erblickt, so lebhaft auch der subjective Blitz sein mag, und dass es ebenso wenig möglich ist, durch diese subjective Erleuchtung des dunkeln Gesichtsfeldes irgend etwas von den wirklichen Objecten der Aussenwelt zu erkennen [1].

Besser untersuchen lässt sich die Wirkung beschränkten Druckes. Wenn man irgendwo am Rande der Augenhöhle mit einer stumpfen Spitze, z. B. der des Fingernagels, gegen den Augapfel drückt, so entsteht eine Lichterscheinung,

---

[1] Ueber einen gerichtlichen Fall, wo Jemand im Finstern einen Schlag auf das Auge bekommen und bei dem dadurch erregten Lichtschein den Angreifer erkannt haben will, s. J. Müller, Archiv für Anat. 1834. S. 140.

Druckbild oder Phosphen, und zwar an derjenigen Stelle des Gesichtsfeldes, welche der gedrückten Stelle der Netzhaut entspricht. Wenn man oben drückt, erscheint also der helle Fleck an der unteren Grenze des Gesichtsfeldes, drückt man am äusseren Augenwinkel, so erscheint er am Nasenrücken, drückt man unten oder innen, so erscheint er oben oder aussen. Wenn der drückende Körper nicht breit ist, hat die Erscheinung gewöhnlich ein helles Centrum, umgeben von einem dunkeln und einem hellen Kreise. Ich finde, dass sie am hellsten ist, wenn der Druck etwa den Aequatorialumfang des Auges trifft, wo die Sclerotica am dünnsten ist. Das Druckbild erscheint dann an der Grenze des dunkeln Gesichtsfeldes als eine helle Bogenlinie, etwa halbkreisförmig. Es ist unter diesen Umständen ziemlich weit von dem Gesichtspunkte (dem am genauesten gesehenen Punkte des Gesichtsfeldes, welcher dem gelben Fleck entspricht) entfernt, und fällt deshalb, wenn man die Augen öffnet, mit dem Bilde äusserer Gegenstände zusammen, die nur undeutlich wahrgenommen werden. Doch erkennt man bei einiger Uebung im indirecten Sehen, namentlich wenn sich auffallend helle Gegenstände am scheinbaren Orte des Druckbildes befinden, dass die Objecte in der Gegend des Druckbildes Verzerrungen (wegen der Einbiegung der Sclerotica und Retina) erleiden, und oft auch stellenweise verdunkelt werden. Man kann aber das Druckbild auch dem Gesichtspunkte näher bringen, wenn man das Auge stark nach innen wendet, während man aussen drückt, oder stark nach aussen wendet, während man am inneren Augenwinkel drückt, dabei wird es ein wenig schwächer, weil die hintere Fläche der Sclerotica dem Drucke grösseren Widerstand leistet. Einzelnen Personen (z. B. THOMAS YOUNG) gelingt es auch wohl durch Druck am äusseren Augenwinkel das Druckbildchen bis an die Stelle des directen Sehens vorzubringen. Mir gelingt dies nicht, doch kommt das Druckbildchen dem Gesichtspunkte so nahe, dass ich wahrnehmen kann, wie in seinem Centrum die Bilder der äusseren Gegenstände verschwinden. In *Fig. 1, Taf. IV.* ist das Druckbild dargestellt, wie es mir erscheint, wenn ich zwischen Auge und Nase ein weisses Papierblatt gegen das Gesicht stelle, das Auge möglichst nach der inneren Seite wende, und mit einer stumpfen Spitze am äusseren Rande der Augenhöhle drücke. *N* bezeichnet die Nasenseite; das Druckbild besteht aus einem dunkeln Flecke, von einem hellen senkrechten Streifen durchzogen. Von dem dunkeln Flecke geht, wenn man in richtiger Höhe drückt, ein horizontaler Fortsatz aus, dessen Spitze bei *a* den Fixationspunkt berührt, und ausserdem ist in der Gegend des Sehnerveneintritts ein unbestimmt gezeichneter Schatten *b* sichtbar. Wie man die Stelle des Sehnerveneintritts im Gesichtsfelde erkennen kann, wird in §. 18 auseinandergesetzt werden. Ein System feiner paralleler bogenförmiger Linien zwischen dem dunkeln Druckbilde und dem Gesichtspunkte hat schon PURKINJE bemerkt und abgebildet. Ich sehe sie nicht so ausgebildet, wie er sie abbildet, am besten, wenn die Helligkeit der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes gross ist.

Im dunkeln Gesichtsfelde dagegen erscheint eine helle gelbliche Kreisfläche, in deren Innerem sich zuweilen ein dunkler Fleck oder ein dunkler Ring abzeichnet. Ein schwaches Licht erscheint auch an der Eintrittsstelle des Sehnerven, sodass die Erscheinung ungefähr der *Fig. 1, Taf. IV.* entspricht, wenn

man Hell und Dunkel vertauscht denkt. Nur den Fortsatz zum gelben Fleck hin habe ich im dunkeln Felde nicht sehen können.

Wieder anders sind die Erscheinungen, wenn man längere Zeit einen mässigen Druck gleichmässig auf den Augapfel wirken lässt, indem man ihn von vorn her entweder mit den weicheren Stellen der Handwurzel oder mit den zusammengelegten Fingerspitzen einer Hand drückt. Nach kurzer Zeit treten dann sehr glänzende und wechselnde lichte Figuren im Gesichtsfelde auf, die ein wunderliches, phantastisches Spiel vollführen und oft den glänzendsten kaleidoskopischen Darstellungen, wie sie in neuerer Zeit mit Hülfe des elektrischen Lichtes entworfen werden, ähnlich sind. Purkinje hat diese Erscheinungen sehr genau verfolgt, beschrieben und abgebildet; sie scheinen in seinen Augen eine grosse Regelmässigkeit gehabt zu haben. Meist zeigten sich auf einem mit feinen Vierecken regelmässig gemusterten Grunde entweder achtstrahlige sternförmige Figuren, oder dunkle oder helle rhombische Flächen, deren Diagonalen vertical und horizontal gerichtet waren, und die von abwechselnd hellen und dunkeln Bändern umgeben waren. Bei mir selbst finde ich keine solche Regelmässigkeit der Figuren; der Grund des Gesichtsfeldes ist meist anfangs fein gemustert, aber in den mannigfaltigsten Weisen und mit den verschiedensten Farben, sehr oft als wären sehr viele feine Blättchen oder Moosstengel ausgestreut, ein anderes Mal erscheinen allerlei Vierecke, hell braungelb, mit dunkeln griechischen Linienmustern, zuletzt entwickeln sich meist auf braungelbem Grunde dunkle Liniensysteme, die zuweilen sehr verwickelte sternförmige Figuren, zuweilen nur einen unentwirrbaren labyrinthischen Knäuel bilden, und in fortdauernder schwankender oder strömender Bewegung begriffen sind. Ausserdem pflegen sich sehr helle blaue oder rothe Funken in einzelnen Stellen des Feldes längere Zeit zu erhalten. Lässt man mit dem Drucke nach, wenn die Erscheinung in grösstem Glanze entwickelt ist, ohne dass äusseres Licht in das Auge dringt, so dauert das Spiel ähnlicher Figuren noch eine Zeit lang fort, und verschwindet, allmälig dunkler werdend. Oeffnet man dagegen das Auge, indem man mit dem Drucke nachlässt, gegen helle äussere Objecte, so herrscht im ersten Momente Dunkelheit, dann werden allmälig in der Mitte des Gesichtsfelds einzelne helle Objecte, aber mit intensivem Glanze sichtbar. So sehe ich z. B. einzelne weisse Papierblätter in ihrer wahren Gestalt in blendender Helligkeit auftauchen, auf ihnen aber noch Reste des vorher vorhandenen Figurenmusters sichtbar, dessen dunkle Theile hier hell erscheinen. Allmälig verliert sich dann die abnorme Helligkeit in demselben Maasse, wie es die Druckbilder vor dem geschlossenen Auge thun, aber noch längere Zeit unterscheidet sich das gedrückte Auge von dem anderen dadurch, dass ihm das Gesichtsfeld mehr violett erscheint, dem ungepressten Auge dagegen gelblich. Vierordt und Laiblin berichten, bei anhaltendem Druck auf das Auge die Verästelungen der Gefässe der Aderhaut roth auf dunklem Grunde gesehen zu haben, was ich bisher vergebens versucht habe. Ausserdem erscheinen Vierordt die Retinalgefässe dabei häufig in einer bläulich glänzenden Färbung. Ferner haben sie, wie auch früher Steinbach und Purkinje, ein Gefässnetz mit strömendem Inhalte gesehen. Letzterer erklärte es für das venöse Adernetz der Retina; Laiblin schliesst aus seinen Beobachtungen, da es neben den

vorher erwähnten Retinalgefässen sichtbar war, dass die wahrgenommene Circulation „einer anderen gefässreicheren mehr nach aussen gelegenen Retinalschicht“ angehören müsse. Meissner und mir selbst ist es nie gelungen, unter den Druckbildern des Auges ausser zuweilen aufblitzenden Zügen der bekannten Aderfigur der Netzhaut etwas einem Gefässnetze Aehnliches zu sehen, und wenn ich auch als Schlussstadium fast immer labyrinthische Liniensysteme in strömender Bewegung sehe, so ist deren Anordnung doch mit keinem Gefässnetze zu vergleichen. Zu bemerken ist übrigens für die Theorie dieser Erscheinungen, dass nach den von Donders mit dem Augenspiegel ausgeführten Untersuchungen durch Druck auf das Auge allerdings Veränderungen in den Netzhautgefässen eintreten, indem zuerst die Venen zu pulsiren anfangen und später das Blut aus ihnen sich ganz entleert. Diese veränderten Zustände der Gefässe mögen von manchen Augen empfunden werden können. Sonst möchte ich die unruhigen und wechselnden Bilder, welche durch anhaltenden Druck im Auge erzeugt werden, mit dem Gefühle des Ameisenlaufens vergleichen, welches in eingeschlafenen Gliedern, deren Nervenstämme längere Zeit einem Drucke ausgesetzt gewesen sind, eintritt. Wenn wir, schief auf einer Hüfte sitzend, den Hüftnerven drücken, verliert bald der Fuss und Unterschenkel die Fähigkeit, Berührung äusserer Objecte zu empfinden; dagegen tritt ein heftiges Kribbeln in den taub gewordenen Theilen der Haut ein, welches in ähnlicher Weise schnell wechselnde Erregungen der empfindenden Nervenfasern verräth, wie sie bei dem entsprechenden Zustande der Netzhaut sich durch die wechselnden feinen Figuren im Gesichtsfelde zeigen. Wenn dann der Druck nachlässt, sind bei wiederkehrender Fähigkeit, äussere Objecte wahrzunehmen, die ersten Berührungen des Fusses oft schmerzhaft, während das Auge äussere Gegenstände in blendendem Lichte wahrnimmt.

Ein anderes Phänomen, was einer mechanischen Reizung der Netzhaut anzugehören scheint, sind gewisse lichte Flecke, welche empfindliche Augen im dunkeln Gesichtsfelde sehen, wenn sie eine schnelle Bewegung des Auges vollführen. In *Fig. 2*, *Taf. IV.* sind sie abgebildet, wie sie im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde beider Augen mir erscheinen, wenn die Augen in Richtung des Pfeils nach links hin bewegt worden sind. Das mit *L* bezeichnete gehört dem linken, das andere dem rechten Auge an. Die Erscheinung ist in dem nach einwärts bewegten Auge, hier dem rechten, weniger entwickelt als in dem nach auswärts bewegten. Ich selbst sehe sie nur des Morgens gleich nach dem Erwachen, oder bei Unwohlsein; andere Beobachter, wie Purkinje und Czermak [1], sehen sie zu jeder Tageszeit im Dunkeln als feurige Ringe oder Halbringe. Ihre Entfernung vom Gesichtspunkte ist eine solche, dass ein Beobachter, der die später zu beschreibenden Phänomene des sogenannten blinden Flecks gut kennt, daraus schliessen kann, dass sie der Eintrittsstelle des Sehnerven angehören. Sie entstehen also wahrscheinlich dadurch, dass bei schnellen Bewegungen des Auges der Sehnerv vom Augapfel mit in Bewegung gesetzt und

---

[1] Physiologische Studien. Abtheilung I. §. 5. S. 42 u. Abth. II. S. 32. — Wiener Sitzungsber. XII. S. 322 u. XV. 454.

an seiner Eintrittsstelle gezerrt wird. Purkinje [1] sieht an der Eintrittsstelle des Sehnerven auch dauernd einen lichten Ring, wenn er das Auge stark nach innen wendet, nach der Mitte des Gesichtsfeldes umgeben von concentrischen hellen Streifen, während bei mir die Erscheinungen nur immer momentan auftauchen. Stellt man den Versuch mit offenem Auge vor einer weissen gleichmässig beleuchteten Fläche an, so erscheinen bei starker Drehung des Auges dunkle Flecken dem Sehnerveneintritt entsprechend, die, wie Czermak bemerkt, beim Drehen nach innen leichter eintreten, und eine regelmässigere Kreisform annehmen als beim Drehen nach aussen. In dem röthlichen Felde, welches die geschlossenen und von aussen beleuchteten Augenlider geben, erscheinen diese dunkeln Flecke blau. Ich selbst erkenne übrigens auch in den dunkeln Flecken Spuren derselben Aehrenform, welche die Lichterscheinung im dunkeln Felde zeigt, während Czermak hervorhebt, dass bei ihm letzte Erscheinung nicht das negative Abbild der ersteren sei. Auch hier scheinen also die gereizten Nervenfasern ihre Empfindlichkeit gegen äussere Reize durch die Zerrung zu verlieren. Als gereizt muss man in diesem Falle wohl die Fasern betrachten, die in unmittelbarer Nähe des Sehnerven enden, da die Eintrittsstelle des Sehnerven selbst gegen Lichtreiz unempfindlich ist, und daher nicht zu erwarten ist, dass dort irgend welche der Lichtempfindung fähige Fasern enden, in deren Folge eine Lichtempfindung gerade an diese Stelle des Gesichtsfelds verlegt werden könnte. Endlich ist hierher auch wohl das von Purkinje [2] und Czermak [3] beobachtete Accommodationsphosphen zu rechnen. Wenn man im Finstern die Augen für das Sehen in nächster Nähe einrichtet und dann plötzlich wieder für die Ferne accommodirt, so bemerkt man nahe an der Peripherie des Gesichtsfeldes einen ziemlich schmalen feurigen Saum, welcher, ringförmig in sich selbst zurücklaufend, in dem Momente aufblitzt, wo man mit der fühlbaren Anstrengung fürs Nahesehen nachlässt. Purkinje sah die Erscheinung auch bei plötzlichem Nachlass gleichmässigen Drucks auf das Auge. Ich selbst habe sie bisher noch nicht sehen können. Czermak erklärt sie dadurch, dass im Momente, wo der Zug des Ciliarmuskels nachlässt, die erschlaffte Zonula sich wieder spannt, während die Linse noch in radialer Richtung verkürzt ist und dadurch eine plötzliche Zerrung des äussersten Randes der Netzhaut eintritt, dessen Ende mit der Zonula verklebt ist.

Accommodire ich stark für die Nähe, während das Auge nach einer gleichmässig erleuchteten weissen Fläche gekehrt ist, so entsteht im Fixationspunkte ein schattiger Fleck, am Rande braun abschattirt, von dem auch wohl braune oder hell violette Streifen sich nach verschiedenen Seiten hinziehen. Dann pflegt sich das Gesichtsfeld schnell zu verdunkeln, während netzförmige Zeichnungen und Theile der Aderfigur, dunkel auf weissem Grunde darin sichtbar werden. Bei Nachlass der Accommodation für die Nähe schwindet alles. Purkinje beschreibt den braunen Fleck, sah aber dessen Centrum weiss. Hierher gehört

---

[1] Beiträge zur Kenntniss des Sehens. S. 78.
[2] Zur Physiologie der Sinne. Bd. I. 126. II. 115.
[3] Wiener Sitzungsber. XXVII. 78.

auch ein elliptischer gefleckter Lichtschein, den PURKINJE [1] bei dunklem Gesichtsfelde erblickte, wenn er mit dem Druck der Augenlider plötzlich nachliess. Damit die Erscheinung zu Stande kam, war es nöthig, dass kurz vorher äusseres Licht auf das Auge gewirkt hat. Ich selbst kann sie nicht sehen.

Durchschneidung und Zerrung des blossgelegten Sehnerven bei Hunden ruft keine Schmerzensäusserungen hervor, während die gleichen Verletzungen ebenso starker Hautnervenstämme die allerheftigsten Schmerzen erregen. Beim Menschen wird durch krebsige Entartungen des Auges zuweilen die Exstirpation des Augapfels nöthig. Wenn der Sehnerv in solchen Fällen noch nicht selbst entartet ist, werden im Augenblicke der Durchschneidung des Sehnerven grosse Lichtmassen gesehen [2], während die Kranken dabei etwas grösseren Schmerz haben, als bei der Durchschneidung der übrigen benachbarten Theile. Dass die Durchschneidung des Sehnerven ganz ohne solchen Schmerz, wie ihn die Tastnerven empfinden, vor sich gehen sollte, dürfen wir nicht erwarten, da wenigstens die übrigen grösseren Nervenstämme ihre *Nervi nervorum* haben, besondere empfindende Fasern, die ihnen ebenso gut zukommen, wie allen übrigen inneren Theilen des Körpers, und welche ihre örtliche Empfindlichkeit vermitteln. Bei den vorderen Wurzeln der Rückenmarksnerven, durch welche nur motorische Fasern aus dem Rückenmarke austreten, kann man nachweisen, dass solche *Nervi nervorum* ihnen aus den hinteren sensiblen Wurzeln zugeschickt werden. Wenn der *Nervus ulnaris* hinter dem inneren Ellenbogenhöcker gestossen wird, giebt sich die Reizung der durchlaufenden Fasern des Nerven durch einen Schmerz kund, der scheinbar im Verbreitungsbezirke des Nerven am fünften und vierten Finger stattfindet, während ein anderer Schmerz an der gestossenen Stelle selbst, welcher unangenehmer ist, als wenn nur die Haut getroffen wäre, den Nerven des Nervenstammes zugeschrieben werden muss. Ebenso fühlen wir, indem wir am äusseren Augenwinkel den Augapfel drücken, örtlich den Schmerz des Druckes mittels der empfindenden Nerven dieser Stelle, und sehen einen Lichtschein, den wir in die Gegend des Nasenrückens verlegen. Etwas Aehnliches kann bei der Reizung des Sehnervenstammes vorkommen.

Dass der Sehnerv und die Netzhaut, welche fähig sind, ein so feines Agens, wie das Licht ist, zu empfinden, gegen die gröbste mechanische Misshandlung ziemlich unempfindlich bleiben, d. h. keinen in das Gebiet der Tastempfindungen gehörigen Schmerz empfinden, erschien früher als ein wunderbares Paradoxon. Die Lösung ergiebt sich einfach daraus, dass die Qualität aller Empfindungen des Sehnerven in den Kreis der Lichtempfindungen gehört. Es fehlt ihm also nicht die Empfindlichkeit, aber die Form der Empfindung ist eine andere.

Sehr mannigfaltig ist ferner das Gebiet der Lichtempfindungen aus inneren Ursachen. Es gehören dahin eine Menge von Lichterscheinungen im Gesichtsfelde, welche in allerlei Krankheitszuständen des Auges oder des ganzen Körpers auftreten, bald über das ganze Feld ergossen, bald räumlich begrenzt, und im

---

[1] Zur Physiologie der Sinne. II. 78.

[2] TOURTUAL in J. MÜLLER Handbuch der Physiologie. Coblenz 1840. Bd. II. S. 259.

letzteren Falle bald in Form unregelmässiger Flecken, bald als Phantasmen, Menschen, Thiere u. s. w. nachahmend. Vielfach mögen dabei mechanische Ursachen mitwirken, vermehrter Druck des Blutes in den Gefässen oder der Augenflüssigkeiten; so sieht man beim Nachlasse gleichmässigen Drucks auf den Augapfel häufig Stücke der Gefässfigur aufblitzen, oder sieht nach heftigen Anstrengungen theils einzelne pulsirende Stellen, theils grössere Stücke der Gefässfigur [1]. In anderen Fällen mag es eine Art chemischer Reizung durch veränderte Zusammensetzung des Blutes sein, z. B. im Falle narkotischer Vergiftungen. Endlich sind manche von diesen Erscheinungen auch wohl zu erklären durch Ausbreitung des Reizungszustandes innerhalb der Centraltheile von anderen Theilen des Nervensystems auf die Wurzeln des Sehnerven. Uebertragung der Reizung von einem ursprünglich erregten empfindenden Nerven auf einen anderen solchen Nerven, der von keinem äusseren Einflusse getroffen ist, nennen wir Mitempfindung. So erregt der Anblick grosser heller Flächen, z. B. von der Sonne beleuchteter Schneefelder, bei vielen Personen gleichzeitig Kitzel in der Nase, oder das Hören gewisser kratzender und quiekender Töne ein Kältegefühl, welches längs des Rückens herabläuft. Dergleichen Mitempfindungen scheinen auch im Sehnervenapparate vorkommen zu können, wenn andere Empfindungsnerven erregt sind, z. B. die des Darms durch Eingeweidewürmer bei Kindern oder durch aufgehäufte Darmcontenta, Blutstockungen und andere Abnormitäten bei Hypochondern. Eigentliche Phantasmen, d. h. Lichtbilder, welche das Ansehen bekannter Objecte der Aussenwelt an sich tragen, scheinen durch eine ähnliche Uebertragung des Erregungszustandes von den bei der Bildung von Vorstellungen thätigen Theilen des Gehirns auf den Sehnervenapparat entstehen zu können. Es sind dergleichen gesehen worden von vielen Beobachtern, welche sich, während sie es sahen, der subjectiven Natur des Phantasma durchaus bewusst waren [2]. Einige, wie Goethe und J. Müller, konnten sogar zu jeder Zeit, wenn sie lange in das dunkle Gesichtsfeld der geschlossenen Augen hineinsahen, dergleichen Erscheinungen sehen.

Uebrigens ist das Gesichtsfeld auch des gesunden Menschen zu keiner Zeit ganz frei von solchen Erscheinungen, die man das Lichtchaos, den Lichtstaub des dunkeln Gesichtsfeldes genannt hat; da es bei manchen Erscheinungen, z. B. den Nachbildern, eine wichtige Rolle spielt, wollen wir es das Eigenlicht der Netzhaut nennen. Wenn man die Augen schliesst und das dunkle Gesichtsfeld aufmerksam betrachtet, wird man anfangs häufig noch Nachbilder der vorher gesehenen äusseren Objecte wahrnehmen (über deren Entstehung siehe unten §. 24 und 25), später ein unregelmässiges schwach beleuchtetes Feld mit mannigfach sich wandelnden Lichtflecken, die häufig Gefässverästelungen oder ausgestreuten Moosstielchen und Blättern ähnlich sind, und bei manchen Beobachtern auch in Phantasmen übergehen. Eine ziemlich häufige Form dieser Lichterscheinungen scheint die zu sein, welche Goethe [3] wandelnde

---

[1] Purkinje zur Physiologie der Sinne. I. 134. II. 115, 118. — Subjective Erscheinungen nach Wirkung der Digitalis II. 120.

[2] Fälle der Art sind zusammengestellt bei J. Müller über phantastische Gesichtserscheinungen Coblenz 1826. S. 20.

[3] Farbenlehre. Abth. I. §. 96.

Nebelstreifen nennt. PURKINJE beschreibt sie als „breite mehr oder weniger gekrümmte Bänder mit zwischenliegenden schwarzen Intervallen, die entweder als concentrische Kreise gegen den Mittelpunkt des Sehfeldes sich bewegen, und dort sich verlieren, oder als wandelnde Bögen an ihm sich brechen, oder als krumme Radien um ihn im Kreise sich bewegen. Ihre Bewegung ist langsam, so dass es gewöhnlich acht Secunden braucht, bis ein solches Band den Weg vollendet und völlig verschwunden ist". Ich selbst sehe sie meist wie zwei Systeme kreisförmiger Wellen, die langsam gegen ihre Mittelpunkte zu beiden Seiten des Gesichtspunktes zusammenlaufen. Die Lage der Mittelpunkte schien mir den Eintrittsstellen der beiden Sehnerven zu entsprechen; die Bewegung fällt mit der der Respirationsbewegungen zusammen. PURKINJE hatte ein schwächeres Auge und sah nur mit dem rechten Auge ein solches System von Nebelstreifen. Uebrigens wird auch der Grund des Gesichtsfeldes, auf dem sich diese Erscheinungen entwerfen, nie ganz dunkel, man sieht im Gegentheile abwechselnde Verfinsterungen und Aufhellungen des Grundes, die oft mit den Athemzügen in gleichem Rhythmus geschehen (J. MÜLLER [1], ich selbst). So bringt auch jede Bewegung der Augen oder Augenlider, jede Veränderung der Accommodation Veränderungen des Lichtstaubes hervor. Auffallend sind diese Gestalten besonders, wenn man in einem unbekannten ganz dunkeln Raume, z. B. in einem dunkeln Treppenflur, den Weg tappend sucht, weil sie sich dann an die Stelle der wirklichen Objecte stellen. Dabei bemerkt PURKINJE, dass jede unvermuthete Berührung, jede unsichere Bewegung momentane Oscillationen des Auges hervorruft, die von zarten Lichtwölkchen und anderen Lichtgebilden begleitet sind, welche Veranlassung zu manchen Gespenstergeschichten gegeben haben mögen.

Nach körperlicher Anstrengung und Erhitzung sah PURKINJE [2] im dunkeln Gesichtsfelde ein mattes Licht wallen und flackern, wie die auf einer horizontalen Fläche verlöschende Flamme von ausgegossenem Weingeiste. Bei schärferer Betrachtung sah er darin unzählige, äusserst kleine lichte Pünktchen, die sich lebhaft durch einander bewegen, und lichte Spuren ihrer Bewegung hinter sich lassen. Eine ähnliche Erscheinung trat ein, wenn er bei geschlossenem rechten Auge das schwache linke zum Sehen anstrengte.

Wichtig ist noch die Erfahrung, dass auch bei Leuten, deren Auge durch Operation entfernt, oder deren Sehnerven und Augen desorganisirt und functionsunfähig geworden waren, subjective Lichterscheinungen vorgekommen sind [3]. Aus diesen Erfahrungen geht hervor, dass nicht blos die Netzhaut, sondern auch der Stamm oder die Wurzeln des Sehnerven im Gehirn fähig sind, in Folge von Reizungen, Lichtempfindung zu erzeugen.

Endlich sind die elektrischen Ströme ein mächtiges Mittel, den Sehnervenapparat, wie die übrigen Nerven zu erregen. Während in der Regel die motorischen Nerven nur in den Augenblicken Zuckung bewirken, wo die Stärke

[1] Phantastische Gesichtserscheinungen. S. 16.

[2] Beobachtungen und Versuche u. s. w. I. 63, 134. II. 115.

[3] Beispiele bei J. MÜLLER Phantastische Gesichtserscheinungen. S. 30. — A. v. HUMBOLDT Gereizte Muskel- und Nervenfaser. Th. II. S. 444. — LINCKE de fungo medullari. Lips. 1834.

des sie durchfliessenden elektrischen Stromes einer schnellen Steigerung oder Abnahme ausgesetzt ist, so werden in den Sinnesnerven nicht nur durch Stromesschwankungen, sondern auch durch einen Strom von gleichmässig anhaltender Stärke Empfindungen hervorgerufen, deren Qualität im letzteren Falle von der Stromesrichtung abhängt.

Wenn der Sehnerv durch Stromesschwankungen gereizt wird, entstehen starke Lichtblitze, die das ganze Gesichtsfeld überziehen. Man kann dieselben sowohl durch Entladungen von Leydener Flaschen als von galvanischen Säulen erzielen, wenn man die Elektricität so durch den Körper leitet, dass hinreichend starke Zweige der Strömung durch den Sehnerven möglichst parallel seinen Fasern gehen. Man legt also zweckmässig den einen Zuleiter an die Stirn oder auf die geschlossenen Augenlider, den anderen in den Nacken, oder wenn man bei hinreichend kräftigen Apparaten einen grossen Widerstand nicht zu scheuen hat, nimmt man ihn in die Hand. Um den Schmerz in der Haut zu mildern, ist es vortheilhaft, die Zuleiter, welche die Form von Platten oder Cylindern haben können, mit nassen Pappscheiben zu bedecken und die zu berührende Hautstelle einige Zeit vorher schon anzufeuchten. Mit den Schlägen von Leydener Flaschen sind bisher wenig hierher gehörige Versuche angestellt worden, auch ist grosse Vorsicht wegen der Nähe des Gehirns nothwendig, da Franklin und Wilcke [1] beobachtet haben, dass durch den Kopf geleitete Schläge ein bewusstloses Zusammenstürzen zur Folge haben können. Le Roy [2] liess den Entladungsschlag auf einen am Staar erblindeten jungen Mann wirken, indem er dessen Kopf und rechtes Bein mit einem Messingdrathe umwand und durch die Enden der Dräthe eine Leydener Flasche entlud. Bei jeder Entladung glaubte der Patient eine Flamme sehr schnell von oben nach unten vorbeigehen zu sehen, und hörte einen Knall wie von grobem Geschütze. Wenn Le Roy den Schlag durch den Kopf des Blinden allein leitete, indem er über den Augen und am Hinterkopfe Metallplatten befestigte, die mit den Belegungen einer Flasche verbunden wurden, so sah der Kranke Phantasmen, einzelne Personen, in Reihe gestellte Volkshaufen u. s. w.

Reicher sind die Erfahrungen über die Wirkungen der galvanischen Ströme. Will man nur die Lichtblitze wahrnehmen, die durch Schliessung oder Unterbrechung des Stromes entstehen, so genügen schon wenige Zinkkupferelemente, bei reizbaren Augen sogar schon ein einfaches Plattenpaar. Wenn zum Beispiel ein Stück Zink an die befeuchteten Lider des einen, Silber an die des anderen Auges gelegt wird, und man die beiden Metalle in Berührung bringt, so erscheint im Momente der Berührung und dann wieder im Momente der Trennung ein Blitz. Belehrender ist der Versuch, wenn man das eine Metall an ein Auge legt, das andere in den Mund nimmt, weil dabei zugleich die Abhängigkeit der Stärke des Blitzes von der Stromesrichtung erkannt werden kann. Der Blitz bei Schliessung der Kette ist nach den Beobachtungen von Pfaff stärker, wenn man das positive Metall (Zink) an das Auge, das negative

[1] Franklin Briefe über Elektricität. Leipzig 1758. S. 312.
[2] *Mém. de mathém. de l'Acad. de France.* 1755. p. 86–92

(Silber) in den Mund bringt, wobei also der Sehnerv von der positiven Elektricität in aufsteigender Richtung durchflossen wird. Ich bemerke hierbei, dass mir selbst die Versuche mit der einfachen Kette, wahrscheinlich wegen zu geringer Reizbarkeit meines Auges, nie gelungen sind. Dagegen sind die Lichtblitze sehr glänzend, wenn man eine kleine galvanische Säule von etwa zwölf Elementen benutzt. Wählt man eine Batterie von constanter Stromesstärke, z. B. von DANIELL'schen Elementen, so findet man, dass der Schliessungsblitz bei aufsteigender Stromesrichtung, der Oeffnungsblitz bei absteigender stärker ist. Aehnliche Unterschiede der Wirkung je nach der Richtung des Stroms sind auch für die Muskelnerven bekannt, sie sind dort aber auch von der Stärke des angewendeten Stroms abhängig.

Um die dauernde Wirkung eines gleichmässig anhaltenden Stroms wahrzunehmen, brauchen wohl die meisten Augen eine kleine Säule, obgleich RITTER auch diese mit der einfachen Kette wahrgenommen hat. Um die Blendung des Auges durch Lichtblitze und das unangenehme Muskelzucken bei Oeffnung und Schliessung des Stroms zu vermeiden, finde ich es vortheilhaft, am Rande des Tisches, neben welchen sich der Experimentirende hinsetzt, zwei mit Pappe, die mit Salzwasser getränkt ist, umwickelte Metallcylinder hinzulegen, die mit den beiden Polen einer DANIELL'schen Batterie von 12 bis 24 Elementen verbunden sind. Man stützt zuerst die Stirne fest auf einen der Cylinder und berührt dann mit der Hand den anderen, wobei man durch langsames Anlegen der Hand erreichen kann, dass die Wirkungen der Stromesschwankung sehr gering sind, dann nach Belieben wieder öffnen oder schliessen kann. Die Stromesrichtung lässt sich wechseln, indem man die Stirn bald auf den einen, bald auf den anderen Cylinder legt. Das Auge ist hierbei auch keinem Drucke ausgesetzt, worauf wohl zu achten ist.

Wenn ein schwacher aufsteigender Strom durch den Sehnerven geleitet wird, wird das dunkle Gesichtsfeld der geschlossenen Augen heller als vorher und nimmt eine weisslich violette Farbe an. In dem erhellten Felde erscheint in den ersten Augenblicken die Eintrittsstelle des Sehnerven als eine dunkle Kreisscheibe. Die Erhellung nimmt schnell an Intensität ab, und verschwindet ganz bei der Unterbrechung des Stroms, die man bei langsamer Lösung der Hand von dem zweiten Cylinder ohne Lichtblitz ausführen kann. Dafür tritt nun, im Gegensatz zu dem vorausgegangenen Blau, mit der Verdunkelung des Gesichtsfeldes auch eine röthlich gelbe Färbung des Eigenlichts der Netzhaut ein.

Bei der Schliessung der entgegengesetzten, absteigenden Stromesrichtung tritt der auffallende Erfolg ein, dass das nur mit dem Eigenlicht der Netzhaut gefüllte Gesichtsfeld im Allgemeinen dunkler wird als vorher, und sich etwas röthlich gelb färbt; nur die Eintrittsstelle des Sehnerven zeichnet sich als eine helle blaue Kreisscheibe auf dem dunkeln Grunde ab, von welcher Scheibe häufig auch nur die der Mitte des Gesichtsfeldes zugekehrte Hälfte erscheint. Bei Unterbrechung dieser Stromesrichtung wird das Gesichtsfeld wieder heller und zwar bläulichweiss beleuchtet, und der Sehnerveneintritt erscheint dunkel.

Die bei absteigender Stromesrichtung eintretende Verdunkelung des Gesichtsfeldes lässt erkennen, dass wir es bei diesen Versuchen nicht, oder

wenigstens nicht allein mit einer Reizung durch Elektricität zu thun haben, sondern dass auch noch die Veränderungen der Reizbarkeit durch elektrische Ströme in Betracht kommen. Durch schwache Ströme wird nach PFLÜGER's [1] Versuchen die Reizbarkeit des Nerven an der Strecke gesteigert, wo die positive Elektricität hinfliesst, an der Strecke vermindert, wo jene Elektricität herkommt. Sie würde demnach bei aufsteigendem Strome am Hirnende des Sehnerven vermehrt, am Retinalende vermindert sein, umgekehrt bei absteigendem Strome. Die Verminderung und Vermehrung des Eigenlichts des Auges würde sich daher nach dem PFLÜGER'schen Gesetze erklären, wenn wir annehmen, dass die inneren Reizmittel, welche es hervorbringen, auf das Hirnende des Sehnerven einwirken. Dann wird der aufsteigende Strom Steigerung, der absteigende Schwächung des Eigenlichts hervorbringen müssen. Ob die entgegengesetzte Beleuchtung am Sehnerven als Contrast oder als innere Reizung am Umfange seines Eintritts in die Netzhaut zu deuten sei, bleibt zweifelhaft. Es stimmt ferner mit der gegebenen Erklärung überein, dass nach RITTER's Bemerkung während der Dauer des aufsteigenden Stroms äussere Gegenstände undeutlicher, während des aufsteigenden Stroms deutlicher erscheinen, denn für Reizungen der Netzhaut selbst muss der aufsteigende Strom die Empfindlichkeit vermehren. Für lichtschwache Objecte kann ich das Factum bestätigen. Uebrigens passt darauf auch vollständig PURKINJE's Erklärung, welcher annimmt, dass die Verminderung der Deutlichkeit des objectiven Sehens von der Vermehrung des Eigenlichts des Auges herrühre, welches wie ein Nebelschleier wirke; jedenfalls verhindert diese Erhellung und Verdunkelung des Gesichtsfeldes zu erkennen, ob man das Licht der einzelnen Objecte stärker oder schwächer empfinde.

Wenn der constante Strom zu fliessen aufhört, bleibt nach PFLÜGER an den unempfindlicher gewordenen Stellen des Nerven vermehrte Empfindlichkeit zurück, wovon in unserem Falle die Aufhellung des Gesichtsfeldes Kunde giebt. An den vorher empfindlicher gewesenen Stellen des Nerven folgt dagegen zuerst ein kurzes Stadium (bis 10 Secunden) verminderter Empfindlichkeit, dem dann wieder schwach gesteigerte Empfindlichkeit folgt. Dem ersteren entspricht in unserem Falle die Verdunkelung des Gesichtsfeldes nach Oeffnung des aufsteigenden Stroms; das letztere giebt sich nur dadurch zu erkennen, dass die Verdunkelung bald in den normalen Zustand überzugehen scheint.

Bei stärkeren Strömen von 100 bis 200 Zink-Kupferplatten hat RITTER eine Umkehr der Färbung gesehen, während die Vermehrung oder Verminderung der Helligkeit dieselbe blieb, wie bei schwachen Strömen. Starke aufsteigende Ströme erregten ihm also die Empfindung von lichtstarkem Grün, noch stärkere von lichtstarkem Roth, starke absteigende von lichtschwachem Blau. Nach der Unterbrechung des Stroms sah er im ersten Falle zuerst Blau, was schnell in das zurückbleibende Roth der schwachen Ströme umschlug. Nach der Unterbrechung des starken absteigenden Stroms sah er dagegen im ersten Augenblicke Roth, was schnell in das gewöhnliche Blau umschlug. Ich selbst fand, dass bei stärkeren Strömen [2]

---

[1] Untersuchungen über die Physiologie des Elektrotonus. Berlin 1859. Siehe darüber unten §. 25.

[2] Der Strom von 24 DANIELL'schen Elementen wurde durch breite, mit nasser Pappe belegte Metallplatten in Stirn und Nacken eingeleitet. Da der Widerstand in diesem Kreise sehr viel geringer war als bei RITTER's

ein wildes Durcheinanderwogen von Farben entstand, in welchem ich keine Regel zu entdecken vermochte.

Ritter giebt auch noch an, dass das aufsteigend durchströmte Auge die äusseren Gegenstände nicht blos undeutlicher, sondern auch verkleinert sehe. Das lässt vermuthen, dass er die Augen für die Nähe accommodirt habe. Man kann sich unter Einfluss des heftigen Hautschmerzes, den die einströmende Elektricität erregt, kaum erwehren, die benachbarten Muskeln zu spannen, die Stirn zu runzeln, die Augenlider zusammenzukneifen. Die meisten Personen sind geneigt, bei jeder Anstrengung des Auges oder seiner Nachbartheile für die Nähe zu accommodiren, und das hat dann auch einen gewissen Einfluss auf die Vorstellung von der Grösse der gesehenen Dinge. Du Bois Reymond [1] macht darauf aufmerksam, dass Zusammenziehung der Pupille bei elektrischer Durchströmung des Auges bemerkt sei, wobei wohl auch eine Veränderung des Accommodationsapparates eintreten könne. Bei absteigendem Strome giebt Ritter umgekehrt an, die Gegenstände deutlicher und grösser gesehen zu haben.

Endlich beschreibt Purkinje noch besondere Gestalten, welche die elektrische Lichterscheinung annimmt, wenn man die Elektricität aus einem Leiter mit schmaler Spitze entweder in die Mitte der geschlossenen Augenlider oder in die Nachbarschaft des Auges einströmen lässt. Im Axenpunkte des Auges zeigte sich die Wirkung des Stromes in der schon angegebenen Weise immer am entschiedensten, hier bildete sich ein rautenförmiger Fleck, der von mehreren abwechselnd dunkeln und hellen rautenförmigen Bändern umgeben war. Die Eintrittsstelle des Sehnerven zeigte dagegen immer die entgegengesetzte Phase elektrischer Wirkung. Bei aufsteigendem Strome also erschien der Axenpunkt des Auges als eine hellblaue Raute, zunächst umgeben von einem dunkeln Bande, der Sehnerv als eine dunkle Scheibe, von einem blauen Scheine umgeben. Bei absteigendem Strome, erschien der Axenpunkt als eine dunkle Raute, umgeben von rothgelben Bändern, der Sehnerv als eine hell leuchtende Scheibe. Bei continuirlicher Strömung verschwanden die Figuren bald, bei intermittirender Strömung, welche Purkinje durch Bewegung der stromleitenden Ketten hervorbrachte, erschien dauernd die blaue Figur, welche an Lichtstärke die entgegengesetzte rothgelbe bei weitem überwog.

Die von Purkinje beschriebenen Erscheinungen an der Eintrittsstelle des Sehnerven werden von den meisten Individuen gesehen, statt der rautenförmigen Figuren dagegen wurden von mir und anderen Personen, welche ich die Versuche anstellen liess, nur unbestimmt begrenzte Lichtmassen gesehen. Purkinje beobachtete ganz ähnliche rautenförmige Figuren bei Compression des Auges. Da mir nicht bekannt ist, dass diese Rautenflächen von einem anderen Beobachter gesehen seien, so bleibt es vorläufig fraglich, ob ihre regelmässige Gestalt nicht auf individuellen Eigenthümlichkeiten von Purkinje's Augen beruhte.

Anordnung, welcher eine Säule von grossem Widerstande, und auch noch seinen Arm in dem Kreise hatte, so lässt sich das Verhältniss der Stromstärke in meinen und Ritter's Versuchen nicht wohl bestimmen.

[1] Untersuchungen über thierische Elektricität. Berlin 1848. Bd. I. S. 353.

Wenn der Strom in der Nähe des Auges durch einen schmalen Zuleiter eingeleitet wurde, so blieb die dem gelben Flecke und dem Eintritte des Sehnerven entsprechende Lichterscheinung dieselbe wie vorher, ausserdem wurde aber an der Grenze des Gesichtsfeldes und ihr parallel ein dunkler Bogen bemerkbar, der bei Bewegungen des Auges seinen scheinbaren Ort behielt, während die vom gelben Fleck und Sehnerven abhängigen Erscheinungen den Bewegungen des Auges scheinbar folgen. Der genannte dunkle Bogen des Gesichtsfeldes befindet sich oben, wenn der Leiter unter dem Auge angelegt ist, rechts, wenn jener links angelegt ist, und umgekehrt. Daraus folgt, dass diejenigen Stellen der Netzhaut kein Licht empfinden, welche dem Leiter am nächsten sind. Um diese Erscheinung deutlich zu sehen, wendete Purkinje übrigens Ketten als Zuleiter an; bei jeder Bewegung gaben diese Stromunterbrechungen.

Die Lehre von den Gesichtsempfindungen fiel in älterer Zeit noch ganz der Philosophie anheim, so lange positive Kenntnisse darüber fehlten. Zunächst musste eingesehen werden, dass die Empfindungen nur Wirkungen der Aussendinge auf unseren Körper seien, und dass die Wahrnehmung erst durch psychische Processe aus der Empfindung gebildet würde. Mit dieser Einsicht ringt die griechische Philosophie [1]. Sie beginnt mit naiven Voraussetzungen über die Möglichkeiten, wie Bilder, die den Gegenständen entsprächen, in die Seele kommen sollten. Demokrit und Epikur lassen solche Bilder sich von den Gegenständen loslösen und in das Auge fliessen. Empedokles lässt Strahlen sowohl vom Lichte wie vom Auge nach den Gegenständen fliessen, und mit letzteren die Gegenstände gleichsam betasten. Plato scheint zu schwanken. Im Timaeus schliesst er sich dieser Vorstellungsweise des Empedokles an; er erklärt die vom Auge ausgehenden Strahlen für ähnlich dem Lichte, aber nicht brennend, und lässt das Sehen nur zu Stande kommen, wo das innere Licht herausgehend an den Gegenständen das verwandte äussere Licht trifft. Im Theaetet dagegen nähert er sich durch Untersuchungen über die geistige Thätigkeit bei den Wahrnehmungen schon dem reiferen Standpunkte des Aristoteles.

Bei letzterem [2] findet sich eine feine psychologische Untersuchung über die Mitwirkung geistiger Thätigkeit in den Sinneswahrnehmungen, das Physikalische und Physiologische, die Empfindung ist deutlich unterschieden von dem Psychischen; die Wahrnehmung äusserer Objecte beruht nicht mehr auf einer Art feiner Fühlfäden des Auges, wie die Gesichtsnerven des Empedokles, sondern auf Urtheil. Das Physikalische an seinen Vorstellungen ist freilich sehr unentwickelt, doch könnte man in den Grundzügen desselben Spuren der Undulationstheorie finden. Denn das Licht ist bei ihm nichts Körperliches, sondern eine Thätigkeit (*ἐνέργεια*) des zwischen den Körpern enthaltenen Durchsichtigen, welches im Zustande der Ruhe Dunkelheit ist. Doch erhebt er sich noch nicht zu der Vorstellung, dass die Wirkung des Lichtes auf das Auge nicht nothwendig dem erregenden Lichte gleichartig zu sein braucht Er sucht vielmehr diese Gleichartigkeit dadurch zu begründen, dass auch das Auge Durchsichtiges enthalte, welches in dieselbe Art von Thätigkeit wie das äussere Durchsichtige treten kann.

Im Mittelalter blieben die eigentlichen und entscheidenden Fortschritte, welche Aristoteles in der Theorie des Sehens gemacht hatte, unbeachtet, erst Baco von Verulam und seine Nachfolger nehmen diesen Faden wieder auf, discutiren scharf die Abhängigkeit der Vorstellungen von den Empfindungen, bis Kant in seiner Kritik der reinen Vernunft den Abschluss ihrer Theorie liefert.

In derselben Zeit waren die Naturforscher meist nur mit dem seit Keppler sich schnell entwickelnden physikalischen Theile der Theorie des Sehens beschäftigt. Durch Haller wurde

[1] S. Wundt zur Geschichte der Theorie des Sehens in Henle und Pfeuffer's Zeitschrift für rationelle Medicin. 1859.

[2] De sensibus, de anima lib. II. c. 5—8 und de coloribus.

zunächst im Allgemeinen die Lehre von der Reizbarkeit der Nerven festgestellt; dem entsprechend beschreibt dieser auch ganz richtig und klar das Verhältniss des Lichtes zur Empfindung, dieser zur Wahrnehmung [1]. Aber es fehlte noch die genauere Kenntniss der durch andere Reizmittel entstehenden Erregungen des Auges, oder wenigstens, was man davon kannte, war vereinzelt, und wurde deshalb nur als Curiosum betrachtet. Das Verdienst, die Aufmerksamkeit der deutschen Naturforscher auf die Wichtigkeit dieser Kenntniss hingeleitet zu haben, gebührt GOETHE in seiner Farbenlehre, wenn ihm auch der Hauptzweck dieses Buches, eine Reform der physikalischen Lichtlehre, die sich der unmittelbaren sinnlichen Anschauung besser anschlösse, zu erzwingen, fehlschlug. Darauf folgen nun die reichen Beobachtungen über Erregungen der Empfindungsnerven von RITTER und den andern Galvanikern, namentlich aber die Beobachtungen von PURKINJE, so dass im Jahre 1826 J. MÜLLER die Hauptsätze dieses Gebiets hinstellen konnte in seiner Lehre von den specifischen Sinnesenergien, wie er sie in seinem Werke über die vergleichende Physiologie des Gesichtsinns zuerst vortrug, und wie sie im Anfange dieses Paragraphen dargestellt ist. Dies Werk und das von PURKINJE stehen in ausgesprochener Beziehung zu GOETHE's Farbenlehre, wenn auch J. MÜLLER deren physikalische Sätze später aufgegeben hat. Das MÜLLER'sche Gesetz von den specifischen Energien war ein Fortschritt von der ausserordentlichsten Wichtigkeit für die ganze Lehre von den Sinneswahrnehmungen, ist seitdem das wissenschaftliche Fundament dieser Lehre geworden, und ist in gewissem Sinne die empirische Ausführung der theoretischen Darstellung KANT's von der Natur des menschlichen Erkenntnissvermögens.

Die Druckbilder kannte schon ARISTOTELES. NEWTON [2] giebt die hypothetische Erklärung, dass die mechanische Erschütterung der Netzhaut eine ähnliche Bewegung in ihr errege, wie die auf diese Haut stossenden Lichtstrahlen. Diese Bewegung der Netzhaut betrachtet er als Ursache der Lichtempfindung. Die Meinung, dass bei den Druckbildern sowohl, als auch bei anderen Gelegenheiten im Auge sich objectives Licht entwickele, hat übrigens bis in neuere Zeit ihre Anhänger gehabt, wovon der oben erwähnte gerichtsärztliche Fall ein Beispiel giebt, in welchem der begutachtende Medicinalrath SEILER die Möglichkeit eines solchen Ereignisses glaubte zulassen zu müssen. Es hat aber niemals ein zweiter Beobachter objectiv das so entwickelte Licht wahrnehmen können. Um diese Meinung wahrscheinlich zu machen, stützte man sich theils auf Fälle von Menschen, die in der Dunkelheit, d. h. bei sehr wenig Licht, hatten sehen können, wie Kaiser TIBERIUS, CARDANUS, KASPAR HAUSER, theils auf das sogenannte Leuchten der Thieraugen, der albinotischen oder sonst krankhaft verbildeten Menschenaugen, welches nur auf Reflexion des Lichts beruht, theils auf stark entwickelte Nachbilder, die des Abends nach verlöschtem Licht bei älteren Männern zuweilen lange zurückzubleiben scheinen; sie sollten die Möglichkeit der Lichtentwickelung im Auge beweisen. Genauere Beschreibungen der Druckbilder sind in neuerer Zeit von PURKINJE, SERRES D'UZÈS gegeben worden. Der Gebrauch, den THOMAS YOUNG in der Accommodationslehre davon machte, ist oben S. 117 erwähnt.

Den Oeffnungs- und Schliessungsblitz bei elektrischer Durchströmung beobachtete schon VOLTA; RITTER nahm selbst mit der einfachen Kette die dauernden Lichtwirkungen wahr, später gab namentlich PURKINJE eine ausführliche Beschreibung.

Mechanische Reizung.

1706. J. NEWTON. Optice, am Schluss Quaestio XVI.
1774. EICHEL in Collectan. soc. med. Havniensis 1774.
1797. A. v. HUMBOLDT. Versuche über die gereizte Muskel- und Nervenfaser. II. 444.
1801. TH. YOUNG *on the mechanism of the eye. Phil. Transact.* 1801. I. 23.
1819 u. 25.* PURKINJE. Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. I. 78, 126. 136, II. 115.
1825. MAGENDIE. *Journal de Physiologie.* IV. 180. V. 189.
1826. J. MÜLLER über die phantastischen Gesichtserscheinungen. Coblenz. S. 30.

---

[1] Elem. Physiolog. Tom. V. lib. 16 u. 17.
[2] Optice, am Schluss Quaestio XVI.

1832. D. Brewster in Pogg. Ann. XXVI. 156, *Phil. Mag.* I. 56.
1833. Seiler in Henke's Zeitschr. für gerichtl. Med. 1833. 4. Quartal. S. 266.
1834. Lincke de fungo medullari. Lipsiae.
Quetelet. Pogg. Ann. XXXI. 494.
J. Müller in seinem Archiv für Anat. und Physiol. 1834. S. 140.
1840. Tourtual in J. Müller's Handbuch der Physiologie II. 259.
1850. Serres d'Uzès *du phosphène.* C. R. XXXI. 375—378.
1854 u. 55.* Czermak physiologische Studien. Abth. I. §. 5. S. 42 und Abth II. S. 32. Wiener Sitzungsberichte XII. 322 und XV. 454.
1856. A. E. Laiblin. Die Wahrnehmung der Choroidealgefässe des eigenen Auges. Dissert. Tübingen.
Meissner. Bericht über die Fortschritte der Physiologie im Jahre 1856. S. 568 in Henle's Zeitschr. für ration. Medicin.

Elektrische Reizung.

1755. Le Roy. *Mém. de Mathém. de l'Acad. de France.* 1755. p. 86—92.
1794. Pfaff in Gren's Journal der Physik VIII. 252, 253.
1795. Pfaff über thierische Elektricität. S. 142.
1798. Ritter Beweis, dass ein beständiger Galvanismus den Lebensprocess im Thierreiche begleite. Weimar 1798. S. 127.
1800. Volta. *Colezione dell' Opere.* Tom. II, P. II. p. 124.
* Ritter. Beiträge zur näheren Kenntniss des Galvanismus. Bd. II. St. 3, 4. S. 159, 166. §. 93.
1801 u. 5. Ritter in Gilbert's Annalen VII. 448. XIX, 6—8.
1819. Purkinje. Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Bd. I. Prag 1819. S. 50. Bd. II. Berlin 1825. S. 31. Kastner's Archiv für die gesammte Naturlehre 1825. V. 434.
1823. Most. Ueber die grossen Heilkräfte des in unseren Tagen mit Unrecht vernachlässigten Galvanismus. Lüneburg 1823. S. 812.
1829. Fechner. Lehrbuch des Galvanismus und der Electrochemie. Kap. 39. S. 485 ff.
1830. Hjort de Functione retinae nervosae. Part. II. Christiania 1830. (Dissert.) p. 31. §. 17.
1848. E. du Bois Reymond. Untersuchungen über thierische Elektricität. I. 283—293; 338—358.

§. 18. Von der Reizung durch Licht.

Wir haben jetzt das objective Licht, die Aetherschwingungen, als Erregungsmittel des Sehnervenapparates zu betrachten. Die Aetherschwingungen gehören nicht zu den allgemeinen Reizmitteln der Nerven, die wie Elektricität und mechanische Misshandlung jede Stelle einer jeden Nervenfaser erregen könnten, und es lässt sich nachweisen, dass die Nervenfasern des Sehnerven innerhalb des Stammes dieses Nerven und innerhalb der Netzhaut von ihnen ebenso wenig wie die motorischen und sensiblen Nervenfäden der übrigen Nerven erregt werden. Es sind vielmehr gewisse Hülfsapparate nothwendig, die an den Enden der Opticusfasern in der Netzhaut liegen, in denen das objective Licht den Anstoss zu einer Nervenerregung zu geben im Stande ist.

Wir wollen hier zunächst nachweisen, dass die Nervenfasern im Stamme des Sehnerven durch objectives Licht nicht erregt werden. Die Masse dieser Fasern liegt an der Stelle, wo der Sehnerv durch die Sclerotica in das Auge eintritt, frei gegen die durchsichtigen Mittel des Auges gekehrt, sie ist nicht von schwarzem Pigment bedeckt, und zugleich durchscheinend genug, dass das Licht, was auf sie fällt, merklich in die Masse des Nerven eindringen kann. Man erkennt dies bei den Untersuchungen mit dem Augenspiegel daran, dass man häufig noch Windungen der Centralgefässe innerhalb des Sehnerven erkennen, kann, die von der Nervenmasse ganz überdeckt sind. Wenn dergleichen

Gefässwindungen im Innern der Nervensubstanz erkannt werden sollen, muss Licht bis zu ihnen hindringen und von ihnen aus wieder bis zum Auge des Beobachters gelangen können. Es ist also kein Hinderniss für das in das Auge fallende Licht vorhanden, bis zu einer gewissen Tiefe in die Sehnervensubstanz einzudringen. Aber dieses Licht, was auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, wird nicht empfunden.

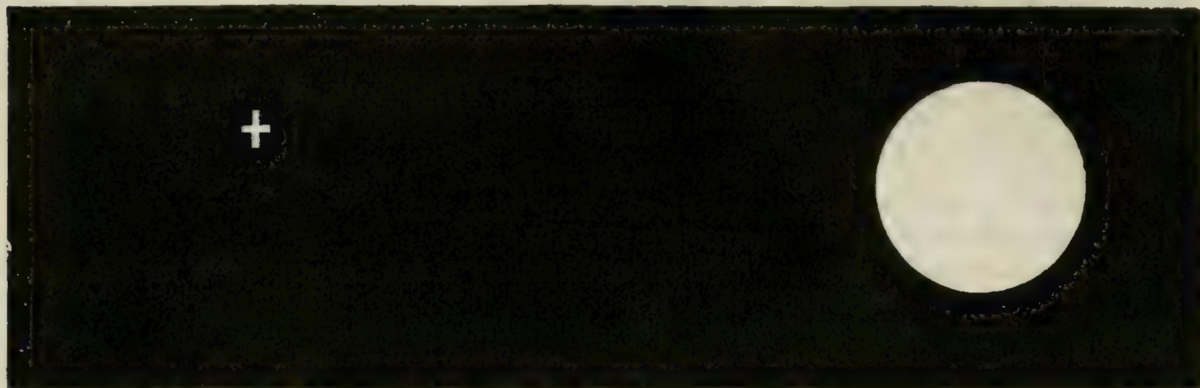


Fig. 100.

Man schliesse das linke Auge und fixire mit dem rechten das weisse Kreuzchen in *Fig. 100*, alsdann bringe man das Buch bei der gewöhnlichen horizontalen Richtung der Zeilen in eine Entfernung von etwa einem Fuss vom Auge, so wird man finden, dass es hier eine gewisse Stellung giebt, wo der weisse Kreis gänzlich verschwindet und der schwarze Grund ohne Lücke erscheint. Damit der Versuch gelinge, achte man aber sorgfältig darauf, dass man den Blick fest auf das Kreuzchen hefte und nicht seitwärts blicke. Nähert man das Buch mehr oder entfernt es weiter, so kommt der weisse Kreis wieder zum Vorschein, und wird im indirecten Sehen deutlich wahrgenommen; ebenso wenn man das Buch schief hält, so dass der weisse Kreis etwas höher oder tiefer zu stehen kommt. Wie der weisse Kreis verschwinden alle anderen Gegenstände, weisse, schwarze, farbige, welche nicht grösser sind als der Kreis, wenn man sie auf denselben legt, und wie vorher verfährt. Man erkennt daraus, dass es im Gesichtsfelde eines jeden einzelnen Auges eine Stelle giebt, in welcher nichts erkannt wird, und dass es also in der Fläche der Netzhaut eine entsprechende Stelle giebt, welche die auf sie fallenden Bilder nicht wahrnimmt. Man nennt diese Stelle den blinden Fleck. Da die blinde Stelle im Gesichtsfelde des rechten Auges nach rechts vom Fixationspunkte, in dem des linken Auges links davon liegt, so muss der blinde Fleck der Netzhaut vom gelben Fleck aus nach der Nasenseite herüber liegen, in welcher Gegend sich die Eintrittsstelle des Sehnerven befindet.

Dass der blinde Fleck wirklich mit der Eintrittsstelle des Sehnerven identisch sei, hatte man schon früher durch Messung seiner scheinbaren Grösse und seines scheinbaren Abstandes vom Fixationspunkte des Auges nachgewiesen. Einen noch directeren Beweis hat Donders [1] mittels seines Augenspiegels gegeben. Er warf mit diesem Instrumente das Licht einer kleinen entfernt stehenden Flamme in das Auge des Beobachteten, und liess dieses so wenden, dass

[1] Onderzoekingen gedaan in het Physiol. Labor. d. Utrechtsche Hoogeschool. VI. 134.

das Flammenbildchen auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fiel. Auf dieser Stelle ist das Flammenbildchen nicht scharf gezeichnet, und es wird gleichzeitig die ganze Eintrittsfläche des Sehnerven, obgleich mindestens 20 Mal grösser als das Flammenbildchen, ziemlich erleuchtet, was sich aus der durchscheinenden Beschaffenheit der Nervenmasse erklärt. Auf der Netzhaut selbst neben dem Eintritt des Sehnerven bemerkte er kaum eine Spur von Licht, was entweder in den durchsichtigen Mitteln des Auges zerstreut sein konnte, oder von der hell erleuchteten Fläche des Sehnerven seitlich reflectirt war. So lange das Lichtbildchen ganz auf den Eintritt des Sehnerven fiel, hatte der Beobachtete keine Lichtempfindung. Einige meinten einen sehr schwachen Schimmer wahrzunehmen, der wohl durch die erwähnte schwache Erleuchtung der Netzhaut veranlasst sein mochte. Durch kleine Bewegungen des Spiegels konnte er das Lichtbildchen von einer Seite nach der anderen über die Eintrittsstelle des Sehnerven wandern lassen, und niemals trat Lichtwahrnehmung ein, ehe nicht ein Theil der Flamme deutlich die Grenze überschritt, und so eine Stelle erreichte, wo die verschiedenen Schichten der Netzhaut schon vorhanden sind. Hieraus folgt, dass der blinde Fleck der ganzen Eintrittsstelle des Sehnerven, und namentlich nicht etwa blos den eintretenden Gefässen entspricht.

Denselben Versuch hat später Coccius[1] an dem eigenen Auge des Beobachters auszuführen gelehrt, wodurch er noch belehrender wird. Man braucht dazu einen durchbohrten Spiegel, plan oder convex, wie er in den Augenspiegeln üblich ist, und hält diesen nahe vor das eigene Auge, während durch die Oeffnung des Spiegels das Licht einer Lampe in das Auge fällt. Richtet man zunächst das Auge gerade nach dem Rand der Oeffnung hin, so gelingt es leicht, das umgekehrte rothe Flammenbildchen auf der Netzhaut des eigenen Auges zu sehen, und indem man dann das Auge mehr und mehr einwärts dreht, während man das Flammenbildchen festzuhalten sucht, gelingt es endlich das Flammenbild auf die Eintrittsstelle des Sehnerven zu bringen und die beschriebenen Beobachtungen anzustellen. Für diesen Zweck ist es übrigens rathsam, die Flamme klein zu machen, oder weit zu entfernen, weil sonst die grosse Menge Licht, die in das Auge dringt, hinderlich ist. Man sieht dabei auch die Gefässstämme, hat aber natürlich immer nur ein sehr kleines Gesichtsfeld. Nimmt man eine grössere Flammenfläche, so wird das Auge zu sehr geblendet, als dass man viel sehen könnte. Ist die Lichtmenge, welche auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, bedeutend, so nimmt das Auge allerdings einen schwachen Lichtschein wahr, aber, wie wir aus diesen Versuchen schliessen müssen, nur deshalb, weil ein Theil des Lichtes sich auf die anstossenden Theile der Netzhaut ausbreitet. Zuweilen entsteht auch bei solchen Versuchen ein rother Lichtschimmer im Auge, wohl wenn ein Gefässstamm auf der Sehnervenfläche stark erleuchtet wird und Licht reflectirt. Dies beobachteten A. Fick und P. du Bois Reymond, wenn sie das Sonnenbildchen einer Convexlinse als Object benutzten.

Die Form und scheinbare Grösse des blinden Flecks im eigenen Gesichtsfelde kann man leicht in folgender Weise bestimmen. Man gebe dem Auge 8 bis 12 Zoll

[1] Ueber Glaukom, Entzündung und die Autopsie mit dem Augenspiegel. Leipzig 1859. S. 40 und 52.

über einer weissen Papierfläche einen festen Standpunkt, und zeichne zuerst auf dem Papier ein Kreuzchen als Fixationspunkt für das Auge. Dann führe man die in Tinte getauchte Spitze einer weissen oder mindestens hell gefärbten Feder auf dem Papiere in die Projection des blinden Flecks hinein, so dass die schwarze Spitze verschwindet, und schiebe sie dann von dessen Mittelpunkte aus nach einander in den verschiedenen Richtungen gegen die Peripherie des Flecks vor, und zeichne die Grenze auf, wo sie anfängt sichtbar zu werden. In dieser Weise habe ich in *Fig. 101* den blinden Fleck meines rechten Auges, bezogen auf den Fixationspunkt a, dargestellt. AB ist der dritte Theil der zugehörigen Entfernung des Auges von der Papierfläche. Man sieht, dass die Gestalt des Fleckes eine unregelmässige Ellipse ist, an der ich selbst wie HUECK die Anfänge von den stärkeren Gefässstämmen erkennen kann, welche austreten. Wenn man einen kleinen schwarzen Fleck auf das Papier macht, und nach einander verschiedene Gesichtspunkte fixirt, so findet man noch, dass die Fortsetzungen der Gefässe weit in das Feld der Netzhaut hinein blinde Stellen sind. Am leichtesten gelingt dies, wenn man nach COCCIUS sich die Richtung der Gefässstämme im eigenen Auge schon aufgesucht hat.



Fig. 101.

Bezeichnen wir die Entfernung des Auges vom Papier mit f, die Entfernung des zweiten Knotenpunkts von der Netzhaut, welche im Mittel 15 Mm. beträgt, mit F, den Durchmesser des blinden Flecks in unserer Zeichnung, oder irgend eine andere lineare Grösse in der Zeichnung mit d, die entsprechende Grösse auf der Netzhaut mit D, so haben wir

$$\frac{f}{F} = \frac{d}{D},$$

woraus wir D berechnen können. Will man sich bei einer solchen Messung von der Grösse F, welche für das individuelle Auge nie ganz genau bestimmt werden kann, unabhängig machen, so misst man besser den Gesichtswinkel, d. h. den Winkel zwischen den Richtungslinien (siehe S. 69), welche den verschiedenen Punkten der Zeichnung entsprechen. Wenn wir voraussetzen dürfen, die auf den Punkt a der *Fig. 101* gerichtete Gesichtslinie sei senkrecht zur Ebene der Zeichnung und die Entfernung ad mit β bezeichnen, den Gesichtswinkel, unter dem ad erscheint, mit α, so ist

$$\frac{\beta}{f} = \operatorname{tg} \alpha,$$

woraus α berechnet werden kann; ebenso ist der Gesichtswinkel zwischen a und jedem anderen Punkte der Zeichnung zu finden. Folgendes sind die Resultate, welche verschiedene Beobachter in dieser Weise erhalten haben:

1) Scheinbarer Abstand des Gesichtspunktes von dem ihm nächsten Theile des Randes des blinden Flecks: LISTING[1] 12° 37',5; HELMHOLTZ 12° 25'; TH. YOUNG 12° 56'.
2) Scheinbarer Abstand des entferntesten Theils des Randes: LISTING 18° 33',4; HELMHOLTZ 18° 55'; TH. YOUNG 16°,1'.

---

[1] Berichte der Königl. sächs. Ges. der Wiss. 1852. S. 149. Ebenda die Beobachtungen von E. H. WEBER.

3) Scheinbarer Durchmesser des blinden Flecks in horizontaler Richtung: HANNOVER und THOMSEN[1] bei 22 Augen 3° 39′ bis 9° 47′, Mittel aller Messungen 6° 10′, LISTING 5° 55′,9; GRIFFIN[2] im Maximo 7° 31; HELMHOLTZ 6° 56′; TH. YOUNG, der nicht ganz zweckmässig zwei Lichter gebraucht hatte, um die Grenze des Flecks zu finden, 3° 5′.

4) Wahrer Durchmesser des blinden Flecks, mit LISTING's Werth für $F = 15$ Mm. berechnet, in LISTING's Auge 1mm,55; HELMHOLTZ 1,81. HANNOVER und THOMSEN im Mittel 1mm,616. Eine Messung von E. H. WEBER des Durchmessers der Eintrittsstelle des Sehnerven in den Augen zweier Leichen ergab 2mm,10 und 1mm,72 (0,93 und 0,76 Par. Lin.). Der Abstand seiner Mitte von der Mitte des gelben Flecks war in dem einen Auge 3mm,8 (1,69 Par. Lin.); derselbe, in LISTING's Auge berechnet, 4mm,05. Der grösste und kleinste Durchmesser des Gefässstrangs in der Mitte des Nerven waren 0,313 und 0,139 Lin., der grösste in dem anderen Auge 0,28 Lin.

Aus diesen Messungen konnte schon vor den Versuchen von DONDERS geschlossen werden, dass die ganze Eintrittsstelle des Sehnerven unempfindlich gegen das Licht sei.

Um die scheinbare Grösse des blinden Flecks im Gesichtsfelde noch anders zu bezeichnen, wollen wir anführen, dass auf seinem Durchmesser neben einander 11 Vollmonde Platz haben würden, und dass in ihm ein 6 bis 7 Fuss entferntes menschliches Gesicht verschwinden kann.

Dass die Sehnervenfasern im Stamme des Sehnerven nicht durch Licht in Reizung versetzt werden können, geht aus den beschriebenen Erscheinungen des blinden Flecks hervor. Dass auch ihre Fortsetzungen, welche von der Eintrittsstelle des Sehnerven über die vordere Fläche der Netzhaut hin ausstrahlen, gegen Licht unempfindlich sind, kann aus dem Umstande geschlossen werden, dass wir begrenzte helle Stellen des Gesichtsfeldes auch wirklich begrenzt sehen. Wenn Licht auf irgend eine Stelle A der Netzhaut fällt, so trifft es hier nicht blos diejenigen Nervenfasern, welche in A endigen, sondern auch solche, welche über A hinausgehen, und an den mehr peripherisch gelegenen Stellen der Netzhaut endigen. Da nun der Ort, an welchem eine Nervenfaser gereizt worden ist, in der Empfindung nicht unterschieden wird, so würde dadurch für die Empfindung derselbe Erfolg eintreten, als wäre Licht auf jene peripherischen Stellen der Netzhaut gefallen. Wir würden unter diesen Umständen von jedem erleuchteten Punkte einen Lichtschweif nach den Grenzen des Gesichtsfeldes sich hinziehen sehen, was nicht der Fall ist. Es können also auch die vor der Netzhaut ausgebreiteten Fasern des Sehnerven nicht durch objectives Licht reizbar sein.

Dass dagegen die hinteren Schichten der Netzhaut gegen Licht empfindlich sind, geht daraus hervor, dass man den Schatten der Netzhautgefässe wahrnehmen kann (§. 15, S. 156). Die Netzhautgefässe liegen in der Schicht der Sehnervenfasern, die feineren zum Theil auch noch in der unmittelbar dahinter liegenden Schicht der Nervenzellen (*Taf. I. Fig. 5, 6* und S. 20, No. 6) und in der fein granulirten Schicht (ebenda 5). Aus den Bewegungen des Schattens dieser Gefässe bei Bewegungen der Lichtquelle haben wir geschlossen, dass die den Schatten empfindende Schicht, die Schicht, in welcher das den Schatten

[1] A. HANNOVER. Bidrag til Odets Anatomie. Kjobenhavn. Cap. VI. S. 61.

[2] GRIFFIN. *Contributions to the physiology of vision.* London, Medical Gazette. 1838 Mai. p. 230.

begrenzende Licht Nervenerregung hervorruft, in geringer Entfernung hinter den Gefässen liegen müsse. Die Messungen von H. Müller (S. 162) ergeben, dass die Entfernung der Gefässe von der Fläche, die ihren Schatten empfindet, zwischen 0,17 und 0,36 Mm. betragen muss. Die Entfernung der Gefässe von der hintersten Schicht der Netzhaut, der der Stäbchen und Zapfen (*Taf. I. Fig. 5 a* und *b*) beträgt nach demselben Beobachter 0,2 bis 0,3 Mm., so dass die empfindende Schicht jedenfalls eine der hintersten Schichten der Netzhaut sein muss, d. h. die Schicht der Zapfen und Stäbchen, oder die äussere Körnerschicht (*Taf. I. Fig. 5 d*). Da an der Stelle des deutlichsten Sehens, in der centralen Grube des gelben Flecks nach den Beobachtungen von Remak und Koelliker nur Nervenzellen und Zapfen vorkommen, so scheinen die letzteren die eigentlich empfindenden Elemente zu sein. H. Müller und Koelliker sprechen auch die Stäbchen als solche an, weil diese mit ähnlichen senkrecht durch die Netzhaut verlaufenden Fasern zusammenhängen wie die Zapfen. Indessen scheint dieser Annahme, wie E. H. Weber bemerkt hat, die Thatsache zu widersprechen, dass an der Stelle des deutlichsten Sehens nur Zapfen vorkommen, während gegen die Peripherie der Netzhaut hin, wo sich immer mehr Stäbchen zwischen die Zapfen einschieben, das Sehvermögen immer unvollkommener wird. Wären die Stäbchen empfindende Elemente, so müsste man im Gegentheil folgern, dass die Empfindlichkeit und die Genauigkeit der Wahrnehmung grösser sein müsste, wo die Zahl der Stäbchen grösser ist, weil von diesen mehr auf demselben Flächenraume enthalten sind als von den Zapfen. Der Zusammenhang mit radialen Fasern kann nichts für die nervöse Natur der Stäbchen beweisen, da ein grosser Theil der radialen Fasern sich an die *Membrana limitans* befestigt, und es daher äusserst wahrscheinlich ist, dass dies Bindegewebfasern, aber nicht Nervenfasern sind. Indem wir hier davon gesprochen haben, dass die hintere Schicht der Netzhaut und speciell die Zapfen die letzten das Licht empfindenden Elemente des Sehnervenapparats seien, so ist dies natürlich nur in dem Sinne geschehen, dass in diesen Gebilden das äussere Licht Veränderungen erregt, welche Nervenerregung und, wenn diese dem Gehirne zugeleitet ist, schliesslich Empfindung zur Folge haben. Wir können sogar nicht verkennen, dass die lichtempfindlichen Elemente der Netzhaut, wie wir sie nennen mögen, ähnlich wie man ja auch in der Photographie von einer lichtempfindlichen Fläche spricht, sich functionell eben durch diese Lichtempfindlichkeit von allen anderen Theilen des Nervensystems unterscheiden, ebenso wie sie es andererseits durch manche Eigenthümlichkeiten ihres anatomischen Baues thun. Weiter folgt denn nun auch, dass die Wirkung des Lichts auf die eigentliche Nervensubstanz der Netzhaut und des Sehnerven keine unmittelbare ist, wie die der Elektricität und der mechanischen Eingriffe, wodurch in jeder Nervenfaser an jeder Stelle ihres Verlaufs die Molecülarveränderungen eingeleitet werden können, welche den Vorgang der Reizung constituiren. Die Wirkung des Lichts ist vielmehr eine mittelbare. Direct wirkt das Licht nur auf die besonderen lichtempfindlichen Apparate, die Zapfen. Es fehlen uns freilich noch alle Anhaltepunkte, um zu unterscheiden, welcher Art diese Wirkung ist, und welcher Grad von Aehnlichkeit zwischen ihr und der

Nervenreizung besteht, ob eine Vibration hervorgerufen wird, wie NEWTON [1], MELLONI [2], SEEBECK [3] und andere Physiker voraussetzten, ob eine Umlagerung der Molecüle in der Weise, wie sie die elektromotorischen Molecüle der Muskeln und Nerven nach E. DU BOIS REYMOND erleiden, ob eine Erwärmung nach DRAPER's [4] Ansicht, oder ob diese lichtempfindliche Schicht der Netzhaut etwa ein photochemischer Apparat ist, entsprechend MOSER's [5] Annahme. Erst secundär ist die Folge dieser Veränderungen Reizung derjenigen Nervenfasern, welche mit den Zapfen, auf die das Licht gewirkt hat, zusammenhängen.

Mit der Grösse der vom Lichte direct afficirten Netzhautelemente hängt auch der Grad der Genauigkeit zusammen, den das Sehen erreichen kann. Das Licht, was auf ein einziges empfindendes Element fällt, kann nur eine einzige Lichtempfindung hervorbringen, in der nicht mehr unterschieden wird, ob einzelne Theile des Elements stark, andere schwach erleuchtet sind. Es können lichte Punkte wahrgenommen werden, deren Netzhautbild sehr viel kleiner ist, als ein empfindendes Netzhautelement, vorausgesetzt, dass die Lichtmenge, die von ihnen in das Auge fällt, gross genug ist, ein Netzhautelement merklich zu afficiren. So werden z. B. die Fixsterne, als Objecte von grosser Lichtstärke, trotz ihrer verschwindend kleinen scheinbaren Grösse, vom Auge wahrgenommen. Ebenso können auch dunkle Objecte auf hellem Grunde wahrgenommen werden, obgleich ihre Bilder kleiner sind, als ein empfindendes Nervenelement, vorausgesetzt nur, dass die Lichtmenge, welche auf das Element fällt, durch das dahin treffende dunkle Bild um einen wahrnehmbaren Theil verringert wird. Kann das Auge z. B. bei der angewendeten Beleuchtungsstärke Unterschiede der Lichtintensität von $1/_{50}$ erkennen, so würde ein dunkles Bildchen, dessen Flächeninhalt $1/_{50}$ von dem eines empfindenden Elements ist, noch wahrgenommen werden können. Dagegen ist es klar, dass zwei helle Punkte nur dann als zwei erkannt werden können, wenn der Abstand ihrer Bilder grösser ist, als die Breite eines Netzhautelements. Wäre er kleiner, so würden beide Bilder immer auf dasselbe oder auf zwei benachbarte Elemente fallen müssen. Im ersteren Falle würden beide nur eine einzige Empfindung erregen, im zweiten Falle zwar zwei Empfindungen, aber in benachbarten Nervenelementen, wobei nicht unterschieden werden könnte, ob zwei gesonderte Lichtpunkte, oder einer da ist, dessen Bild auf die Grenze beider Elemente fällt. Erst wenn der Abstand der beiden hellen Bilder, oder wenigstens ihrer Mitte von einander grösser ist, als die Breite eines empfindenden Elements, erst dann können die beiden Bilder auf zwei verschiedene Elemente fallen, die sich gegenseitig nicht berühren, und zwischen denen ein Element zurückbleibt, welches nicht oder wenigstens schwächer als die beiden ersten von Licht getroffen wird.

Nach den Angaben von HOOKE [6] erscheinen zwei Sterne, deren scheinbare Entfernung weniger als 30 Secunden beträgt, stets wie ein Stern, und von

---

1 Optice. Lib. III. Quaestio XVI.
2 Pogg. Ann. LVI. 574.
3 Ebenda. LXII. 571.
4 *Human Physiology*. p. 392.
5 Pogg. Ann. LVI. 177.
6 SMITH's Optik, übers. v. KAESTNER. S. 20.

Hunderten kann kaum einer die beiden Sterne unterscheiden, wenn ihre scheinbare Entfernung weniger als 60 Secunden beträgt. Die übrigen Beobachter, welche nicht an Sternen, sondern an weissen beleuchteten Strichen oder Vierecken ihre Beobachtungen angestellt haben, fanden eine etwas geringere Genauigkeit. Es wurden von dem besten, von E. H. Weber untersuchten Auge zwei weisse Striche unterschieden, deren Mittellinien 73 Secunden von einander entfernt waren. Bei stärkerer Beleuchtung komme ich selbst unter möglichst günstigen Umständen bis 64 Secunden. In Listing's schematischem Auge entspricht auf der Netzhaut

ein Gesichtswinkel von	einem Abstande von
73″	0,00526 Mm.
63″	0,00464 „
60″	0,00438 „

Nach Koelliker's Messungen beträgt die Dicke der Zapfen im gelben Flecke 0,0045 bis 0,0054 Mm. (siehe S. 22), was fast genau mit den vorigen Zahlen übereinstimmt, so dass auch durch diese Messungen die Annahme, dass die Zapfen die letzten empfindenden Elemente der Netzhaut bilden, bestätigt wird.

Gleichzeitig ergiebt sich, dass die optische Beschaffenheit eines gut gebauten und richtig accommodirten Auges vollkommen genügt, um den Grad von Genauigkeit, welchen die Grösse der nervösen Elemente möglich macht, auch wirklich zu erreichen. Wir haben freilich (§. 13, S. 131) gefunden, dass bei einem Durchmesser der Pupille von 4 Mm. der durch Farbenzerstreuung erzeugte Zerstreuungskreis einen Durchmesser von 0,0426 Mm. hat, also fast 10 mal grösser ist, als die Dicke der Zapfen, aber dort auch schon die Gründe angegeben, warum diese Zerstreuungskreise trotz ihrer Grösse das Sehen nicht erheblich beeinträchtigen. Die Abweichungen wegen Asymmetrie des Auges (§. 14, S. 145) sind meist viel geringer, und beeinträchtigen das Sehen weniger, wenn nicht gleichzeitig horizontale und verticale Linien gesehen werden sollen.

Auf den Seitentheilen der Netzhaut ist die Unterscheidungsfähigkeit viel geringer als im gelben Flecke, und zwar ist die Abnahme in der Nähe des Netzhautcentrum geringer, als in grösserer Entfernung davon. Nach den Messungen von Aubert und Förster ist die Abnahme nach verschiedenen Richtungen hin von Centrum aus verschieden schnell, und zwar geschieht sie nach oben und unten am schnellsten, nach der äusseren Seite der Netzhaut hin am langsamsten; dabei scheinen die individuellen Unterschiede ziemlich bedeutend zu sein. Ein auffallendes Resultat ihrer Messungen ist auch, dass bei der Accommodation für die Ferne die Abnahme nach den Seiten der Netzhaut hin schneller zu geschehen scheint, als beim Nahesehen. Sie fanden, dass eine ähnliche Abnahme der Genauigkeit der optischen Bilder wenigstens in Kaninchenaugen nach den Seiten der Netzhaut hin nicht stattfindet. Dadurch wird constatirt, dass die Unvollkommenheit des Sehens auf den seitlichen Netzhauttheilen nur von der Beschaffenheit der Netzhaut, nicht von der der optischen Bilder abhängt.

Als Object für die Feststellung der kleinsten zu unterscheidenden Distanzen hat Tob. Mayer und nach ihm E. H. Weber weisse parallele Linien benutzt,

welche durch gleich breite schwarze getrennt waren, VOLKMANN benutzte Spinnwebfäden auf hellem Grunde, ich selbst fand der Beleuchtung wegen passender ein Gitter von schwarzen Dräthen zu benutzen, dessen Zwischenräume gleich dem Durchmesser der Dräthe waren, und welches vor den hellen Himmel gestellt wurde. Ausserdem hat TOB. MAYER auch weisse Vierecke benutzt, theils durch ein schwarzes Gitter getrennt, theils schachbrettartig geordnet.

Man muss bei der Anstellung der Versuche darauf achten, dass das Auge vollständig accommodirt werden könne, und wenn man gröbere Objecte benutzt, und sich daher weiter entfernen muss, ein passendes Concavglas vor das Auge nehmen. Die Beleuchtung muss stark sein, ohne doch blendend zu werden. Bei diesen Versuchen bemerkte ich eine auffallende Formveränderung der geraden hellen und dunkeln Linien. Die Breite jedes hellen und jedes dunkeln Streifen des von mir gebrauchten Gitters betrug $\frac{13}{24} = 0{,}4167$ Mm. In dem Abstande von 1,1 bis 1,2 Meter fing die Erscheinung an sichtbar zu werden. Das Gitter bekam etwa das Ansehen wie in *Fig. 102 A*, die weissen Streifen erschienen zum Theil wellenförmig gekrümmt, zum Theil perlschnurförmig mit abwechselnd dickeren und dünneren Stellen. Es seien in *Fig. 102 B* die kleinen Sechsecke Querschnitte der Zapfen des gelben Flecks, *a*, *b* und *c* drei optische Bilder von den gesehenen Streifen, diese sind oberhalb *dd* in ihrer wirklichen Form dargestellt, unterhalb *dd* aber sind alle Sechsecke, deren grössere Hälfte schwarz war, ganz schwarz gemacht, deren grössere Hälfte weiss war, ganz weiss, weil in der Empfindung immer nur die mittlere Helligkeit jedes Elements wahrgenommen werden kann. Man sieht, dass dadurch in der unteren Hälfte von *Fig. 102 B* ähnliche Muster entstehen, wie in *A*. PURKINJE [1] hat Aehnliches gesehen, und auch BERGMANN hat beobachtet, dass zuweilen, ehe die Streifen des Gitters ganz verschwinden, dasselbe schachbrettartig erscheint, zuweilen Streifen in querer Richtung gegen die wirklich vorhandenen gesehen werden, was sich alles durch ähnliche Verhältnisse, wie die hier berührten, erklären lässt [2].

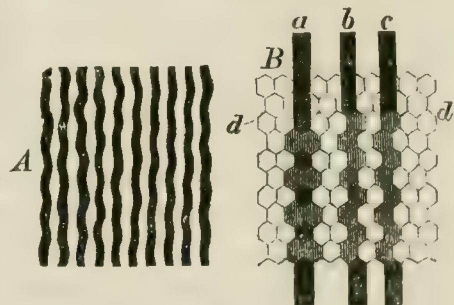


Fig. 102.

Wenn bei den Beobachtungen zwei leuchtende Objecte benutzt worden sind, deren Breite gegen ihren Abstand verschwindet, so können sie als zwei nur erkannt werden, wenn zwischen den Netzhautelementen, welche ihre Bilder empfangen, ein anderes zurückbleibt, welches dunkel bleibt. Der Durchmesser eines solchen Elements muss also jedenfalls kleiner sein, als der Abstand der beiden hellen Bilder. Ist die Breite der Objecte aber gleich dem dunkeln Streifen zwischen ihnen, so ist es nicht gerade nöthig, dass die Netzhautelemente schmaler seien, als das Bild des dunkeln Streifens. Ein Netzhautelement, welches von dem Bilde des dunkeln Streifens getroffen wird, und mit seinen Seitenrändern noch zum Theil in die hellen Streifen hineinragt, wird deshalb doch noch weniger Licht als seine Nachbarn empfinden können, vorausgesetzt, dass die ganze Lichtmenge, von der es getroffen wird, kleiner ist, als die der Nachbarn. Wir können in solchen Fällen deshalb mit Gewissheit nur soviel folgern, dass die Netzhautelemente kleiner seien als die Entfernung der Mittellinien der hellen Streifen. Auch zeigt sich in der That in den unten angeführten Versuchen von TOB. MAYER, dass bei parallelen Linien die Unterscheidbarkeit dieselbe bleibt, wenn sich die Breite des Schwarz oder Weiss ändert, aber die Summe der Breite eines schwarzen und eines weissen Streifen

[1] Beobachtungen und Versuche. I. 122.
[2] HENLE und PFEUFFER. Zeitschrift für ration. Medicin. (3.) II. 88.

constant bleibt. Deshalb habe ich als Breite des Objects immer die Summe angegeben, welche der Entfernung der Mittellinien zweier benachbarter Objecte gleich ist, abweichend von MAYER und WEBER, und danach auch den kleinsten Gesichtswinkel berechnet.

Beobachter.	Object.	Grösse des Objects.	Entfernung vom Auge.	Entfernung dividirt durch Grösse des Objects.	Gesichtswinkel in Secunden.
1) HOOKE	Fixsterne	—	—	—	60
2) TOB. MAYER	a) Parallele Linien mit gleichen Zwischenräumen	0,72 Par. Lin.	11 Par. Fuss	2200	94
	b) Eben solche mit breiteren und schmaleren Zwischenräumen	0,6 „ „	$9\frac{1}{2}$	2275	90
3) Derselbe	Weisse Quadrate durch ein schwarzes Gitter getrennt	0,88 „ „	$15\frac{1}{2}$	2422	80
4) Derselbe	Schachbrettmuster	1,04 „ „	12	1661	124
5) VOLKMANN	Spinnwebfäden	0,0052 Par. Zoll.	7 Par. Zoll.	1346	147,5
6) N. N. bei VOLKMANN	Dieselben	—	13	2500	80,4
7) TH. WEBER bei E. H. WEBER	Parallele Linien mit gleich breiten Zwischenräumen	0,05 Par. Lin.	$110\frac{1}{2}$ Par. Lin.	2210	90,6
8) N. N. 1 bei demselben	Dieselben	—	138	2760	73
9) N. N. 2 bei demselben	Dieselben	—	$110\frac{1}{2}$	2210	90,6
10) HELMHOLTZ	Stabgitter	1,083 Millim.	3500 Millimeter	3235	63,75
11) O. H. bei demselben	Dasselbe	—	2400	2215	93
12) BERGMANN	Parallele Linien mit gleich breiten Zwischenräumen	2 Millimeter	5500 bis 8000	2750 4000	75 51,6

Dass die Grenze des Erkennens bei meinem eigenen Auge etwas weiter hinausgerückt ist, als bei den übrigen Augen Erwachsener, erkläre ich mir durch die hellere Beleuchtung, welche bei meinem Stabgitter möglich war. Das genaueste Auge, von Bergmann beobachtet, war das eines Knaben von 10 Jahren. Ueber den Einfluss der Erleuchtung hat Tob. Mayer Versuche angestellt. Er fand, dass Liniensysteme am besten erkannt wurden bei der Beleuchtung recht hellen Tageslichts, dass Steigerung der Helligkeit nichts nützte. Geringere Grade von Helligkeit erzeugte er des Nachts, indem er ein Licht in verschiedenen Entfernungen vor das Papier setzte. Je grösser die Entfernung des Lichts, desto mehr musste er sich nähern. Während das Licht aus $1/2$ Fuss Entfernung allmälig auf 13 Fuss gebracht wurde, wuchs der Gesichtswinkel für weisse Streifen mit gleich breiten Zwischenräumen (wie oben gerechnet) von 138″ auf 344″, und er bildet sich die empirische Formel, welche seinen Messungen ziemlich gut entspricht $s = 158'' \sqrt[3]{a}$, wo s der Gesichtswinkel und a die Entfernung des Lichtes. Da nun die Helligkeit $h = \frac{1}{a^2}$ folgert er weiter $s = \frac{158''}{\sqrt[6]{h}}$.

Die Untersuchungen von Aubert und Förster über die Genauigkeit des Sehens auf den Seitentheilen der Netzhaut sind nach zwei Methoden ausgeführt worden. Bei der ersten Methode blickte der Beobachter durch eine geschwärzte Röhre, welche fest aufgestellt war, dadurch die Stellung seines Auges sicherte und sein Auge vor blendendem Seitenlicht schützte, nach einem mit Buchstaben und Zahlen, die in gleichen Zwischenräumen von einander standen, bedruckten Bogen (2 Fuss breit, 5 Fuss lang) hin. Dieser war auf zwei horizontale Walzen aufgerollt, so dass der vom Beobachter gesehene Theil nach jedem Versuch schnell gewechselt werden konnte. Da die aufgedruckten Buchstaben und Zahlen ferner ganz willkührlich durch einander gestellt waren, konnte der Beobachter auch nie andere Zahlen errathen, als die er wirklich gesehen hatte. Vor dem Bogen stand eine Leydener Flasche, welche sich von Zeit zu Zeit entlud, und dadurch den Bogen auf einen Moment erhellte, während es in den Zwischenzeiten so dunkel war, dass der Beobachter eben nur den Ort der Buchstaben, aber nicht ihre Form erkennen konnte. Während ein Gehülfe den Bogen mit den Buchstaben beliebig stellte, gab der Beobachter nach jeder Beobachtung an, welche Buchstaben er erkannt hatte. Es wurden vier solche Bogen mit Ziffern und Buchstaben von verschiedener Grösse gebraucht. Der Abstand des Beobachters von den Objecten konnte geändert werden.

Nennen wir mit Aubert den doppelten Winkel zwischen der Gesichtslinie und der Richtungslinie der äussersten gesehenen Buchstaben, d. h. also den Gesichtswinkel des mit erkennbaren Zahlen besetzten Raumes, den Raumwinkel, und den Winkel, unter welchem die grössten Dimensionen der gesehenen Buchstaben und Zahlen dem Beobachter erschienen, den Zahlenwinkel, so ergab sich, dass bei gleicher wirklicher Grösse der Zahlen das Verhältniss des Zahlenwinkels zum Raumwinkel nahehin constant war; nur bei Raumwinkeln über 30 oder 40° waren die Zahlenwinkel etwas grösser, als dies Verhältniss erforderte. Dagegen fand sich, dass bei constanter scheinbarer Grösse der Zahlen kleine nahe Zahlen besser erkannt wurden als grössere ferne. Es fand sich nämlich die Verhältnisszahl des Raumwinkels dividirt durch den Zahlenwinkel, wie folgt:

Wirkliche Grösse der Zahlen in Mm.	Grenze des Raumwinkels.	Verhältniss des Zahlenwinkels dividirt durch den Raumwinkel.		
		Minimum.	Maximum.	Mittel.
26	25°	7	7,9	7,18
26	40	6	7,3	6,69
13	27	11	12	11,14
7	27	9,7	14,5	12,79

In der zweiten Columne ist als Grenze des Raumwinkels derjenige Werth desselben angegeben, bis zu welchem die Messung ging, oder wenigstens nahehin constante Verhältnisszahlen lieferte. Die letzte Columne zeigt, dass das Verhältniss zwischen Zahlenwinkel und Raumwinkel steigt, wenn die wirkliche Grösse der Zahlen sich verkleinert. Dieses letztere Factum ist sehr räthselhaft. Sollte der Mechanismus der Accommodation die peripherischen Theile der Netzhaut verändern? Aubert macht die Annahme, dass die Stäbchen beim Fernsehen in den Randtheilen der Netzhaut sich schief stellen und dadurch den normalen Gang der Lichtstrahlen hemmen.

Die zweite Methode der Untersuchung wurde mittels des in *Fig. 105* abgebildeten Apparats bei gewöhnlichem Tageslichte ausgeführt. *A* ist ein weiss lackirter Blechstreifen von 0,3 Meter Länge und 0,05 Meter Breite, welcher nach Art der Flügel einer Windmühle um die Axe *u* gedreht werden kann. Der Blechstreifen mit seiner Axe lässt sich an einer verticalen Stahlstange *B* auf- und abschieben, welche auf einem Brettchen *C* befestigt ist. Am anderen Ende des Brettchens, gegenüber der Axe des Blechstreifens, befindet sich das eine Auge des Beobachters, während sein anderes Auge durch den schwarzen Papierschirm *D* verdeckt ist, welcher an einem Holzstabe *d* so befestigt ist, dass er nach links und rechts gedreht werden kann. Die Axe des Blechstreifens ist 0,2 M. von dem Mittelpunkte der Grundlinie beider Augen des Beobachters entfernt. Das Brettchen *C* hat unten eine Handhabe.

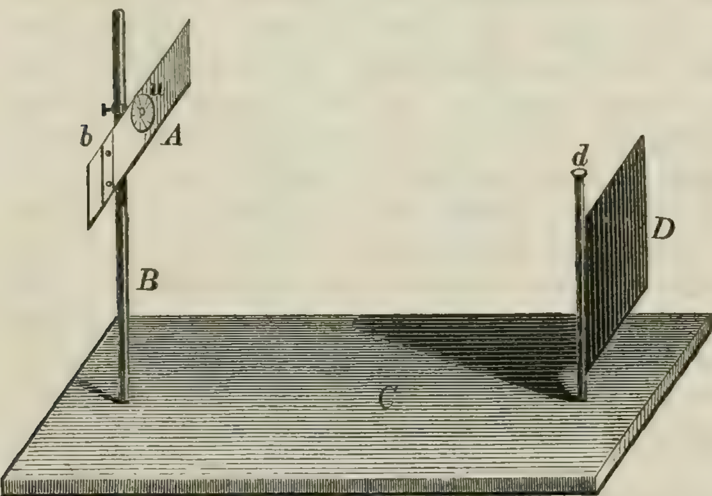


Fig. 105.

Bei den Versuchen legte der Beobachter die Nase an den Holzstab *d*, verdeckte mit dem Schirm das eine Auge, stützte sein Kinn auf das Brett vor dem Schirm und stellte die Axe der Blechtafel in gleiche Höhe mit den Augen. Nun fixirte er den Mittelpunkt der Tafel (oder die Spitze ihrer Axe) unverwandt, und schob allmälig von der Seite her in den Falzen der Blechtafel eine weisse Karte (*b*) mit 2 Punkten nach dem fixirten Punkte hin. Sobald er, bei ununterbrochen fester Fixation, mit den seitlichen Theilen der Retina die zwei Punkte unterschied, hielt er die Karte fest und las die Entfernung der beiden Punkte von dem Fixationspunkte an einer Metereintheilung, welche sich an den Falzen der Blechtafel befand, ab, und dies wurde für verschiedene Neigungen der Blechtafel gegen den Horizont

ausgeführt. Die schwarzen Flecke auf der Karte waren rund, von verschiedener Grösse und verschiedenem gegenseitigen Abstande. Beide Punkte standen immer gleich weit von der Drehungsaxe ab.

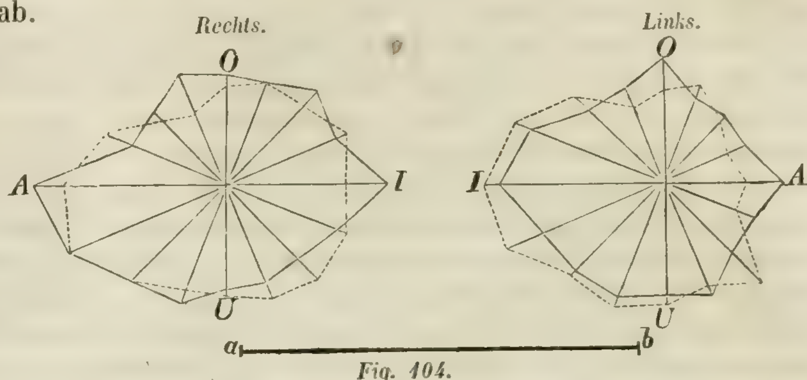


Fig. 104.

Die *Fig. 104* stellt die Resultate dieser Messungen für ein Paar schwarze Flecke von 2,5 Mm. Durchmesser und 14,5 Mm. gegenseitigen Abstand dar. Die ausgezogene Grenzlinie bezieht sich auf Aubert's, die punktirte auf Förster's Augen. Der Schnittpunkt der *Radii vectores* entspricht dem Fixationspunkte der Augen, die gezogenen *Radii vectores* selbst entsprechen den einzelnen Messungen und ihrer Richtung nach den verschiedenen Stellungen der Blechtafel. *O* bedeutet oben, *U* unten, *A* aussen, d. h. Schläfenseite, *I* innen oder Nasenseite. Die Linie *ab* bezeichnet die entsprechende Entfernung des Auges von der Blechtafel, welche 0,2 Meter betrug. Alle Lineardimensionen sind auf $1/5$ reducirt[1]. Es stellen also diese Flächen zunächst diejenigen Theile des Gesichtsfeldes dar, innerhalb deren man zwei Punkte von der angegebenen Grösse und Entfernung von einander unterscheiden kann; will man die entsprechenden Flächen der Netzhaut haben, so muss man sie umkehren. Die unregelmässig ovale Gestalt dieser Flächen zeigt beträchtliche individuelle Abweichungen selbst zwischen den beiden Augen derselben Person.

Die mittleren Resultate der Messungen an verschiedenen Paaren von schwarzen Flecken sind in *Fig. 105* dargestellt. Der Fixationspunkt ist *a* und *ab*, *ac* sind die Mittel sämmtlicher Entfernungen, welche bei allen vier Augen in je 8 verschiedenen Meridianen für das bezüglich bei *b*, *c* u. s. w. stehende Paar von Punkten an der Blechtafel eingestellt wurden. Bei *c* ist das Paar von Punkten, auf welche sich *Fig. 104* bezieht. Man sieht, dass in grösserer Entfernung die Breite des Objects schneller zunehmen muss, als bei kleineren Entfernungen. Die gefundenen Mittelzahlen selbst sind folgende:



Fig. 105.

Entfernung der Punkte in Mm.	Durchmesser der Punkte in Mm.	Mittlerer Abstand vom Centrum der Blechtafel in Mm.
3,25	1,25	31
6,5	2,5	50
9,5	3,75	55
12	1,25	60
14,5	2,5	65
20,5	3,75	77

Bei diesen Versuchen fanden die beiden Beobachter übrigens auch öfters unempfindliche Stellen der Netzhaut, gleichsam kleine blinde Flecke, wo einer der Punkte

[1] Die Angabe Aubert's, dass sie auf $1/4$ reducirt seien, passt nicht zu den angegebenen Zahlen.

oder beide plötzlich verschwanden. Ausser solchen Stellen, wo nur eine vorübergehende Blendung stattzufinden schien, waren auch constante vorhanden, die immer wieder zu finden sind.

Die Erscheinungen des blinden Flecks wurden von Mariotte entdeckt, der mit der Absicht an diese Versuche ging, zu untersuchen, welcher Art das Sehen auf der Eintrittsstelle des Sehnerven sei. Der Versuch erregte damals solches Aufsehen, dass er ihn 1668 vor dem Könige von England wiederholte. Picard gab dem Versuche eine Form, bei der man beide Augen offen halten kann, und doch eine Sache nicht sieht. Zu dem Ende befestigte er an einer Wand ein Papier, stellte sich in die Entfernung von etwa 10 Fuss davon, und liess die Augen nach dem nah vor das Gesicht gehaltenen Finger convergiren, so dass in beiden Augen das Bild auf den blinden Fleck fällt, und deshalb gar nicht gesehen wird, während es sonst unter diesen Umständen doppelt erscheint. Mariotte überbot ihn, indem er bei zwei offenen Augen zwei Objecte verschwinden liess. Man befestigt an der Wand zwei Papiere gleich hoch, drei Fuss von einander, stellt sich 12 bis 13 Fuss von der Wand entfernt, hält den Daumen etwa 8 Zoll weit vom Auge, so dass er dem rechten Auge das linke Papier, dem linken Auge das rechte Papier verdeckt, und fixirt den Daumen, dann verschwinden auch die beiden Papiere, weil sie in demjenigen Auge, dem sie nicht verdeckt sind, auf den blinden Fleck fallen. Le Cat versuchte auch schon die Grösse des blinden Flecks auf der Netzhaut zu berechnen, wobei er ihn freilich viel zu klein, nämlich $1/5$ bis $1/4$ Linie fand. Daniel Bernouilli zeichnete seine Form auf den Fussboden, indem er eine Münze auf den Fussboden eines Zimmers legte, ein Pendel nahm, dessen eines Ende er an das rechte Auge hielt, und das andere den Boden fast berühren liess. Das linke Auge verschloss er, mit dem rechten sah er am Pendel herunter, und suchte nun die Stellen auf dem Fussboden auf, wo die Münze anfing unsichtbar zu werden; er fand eine fast elliptische Figur. Die Berechnung der Grösse des blinden Flecks auf der Netzhaut lieferte ihm aber wegen ungenügender Kenntniss der optischen Constanten des Auges einen zu hohen Betrag, nämlich $1/7$ des Augendurchmessers.

Es knüpfte sich an die Entdeckung von Mariotte sogleich eine weitläufige Discussion über eine Frage, die bei den damaligen geringen Kenntnissen der Nervenleistungen natürlich gleich entstehen musste, nämlich die Frage, ob denn überhaupt die Netzhaut es sei, wie Keppler und Scheiner vorausgesetzt hatten, welche das Licht empfände. Mariotte schloss, dass es vielmehr die Aderhaut sei, denn diese fehlt im blinden Flecke, während die Fasern der Netzhaut dort gerade recht dicht zusammenliegen. In der That schlossen sich eine Reihe namhafter Optiker der Meinung von Mariotte an, wie Mery, Le Cat, Michell, unter den Neueren D. Brewster. Es wurde namentlich hervorgehoben, dass die Netzhaut das Licht wegen ihrer Durchsichtigkeit nicht zurückhalte, dass sie zu dick sei, um ein scharfes Bild zu geben; auch suchte Le Cat nachzuweisen, dass die Aderhaut eine Fortsetzung der *Pia Mater* des Gehirns sei. Die Lichtempfindlichkeit der Netzhaut wurde vertheidigt durch Pecquet, de la Hire, Haller, Porterfield, Perrault, Zinn. Der Hauptgrund für die Meinung dieser Männer war eigentlich immer nur, dass die Netzhaut die anatomische Entfaltung eines mächtigen Nerven ist, während die Aderhaut nur wenige dünne Nerven enthält. Was sie sonst von Gründen beibringen konnten, um ihre Meinung zu stützen und die Schwierigkeiten des Mariotte'schen Versuchs zu beseitigen, war nicht viel werth. Porterfield nahm an, dass der Sehnerv, an seiner Eintrittsstelle noch von den sehnigen Nervenscheiden umgeben und durchzogen, nicht weich und zart genug sei, um ein so feines Agens, wie das Licht sei, zu empfinden. Haller hebt ebenfalls hervor, dass an der Eintrittsstelle des Sehnerven keine eigentliche Netzhaut vorhanden sei, sondern eine weisse cellulöse und poröse Haut, die zum Sehen untauglich sein könne, ohne dass die Netzhaut es sei. Andere, wie Rudolphi, anfangs auch Coccius, glaubten, dass die unempfindliche Stelle nur den Centralgefässen des Sehnerven entspräche, was aber widerlegt wurde, sobald man die optischen Constanten des Auges besser kennen lernte, z. B. durch Hannover, E. H. Weber, A. Fick und P. du Bois Reymond. J. Müller glaubte die Erscheinung durch die Annahme erklären zu können, dass die Mariotte'sche Erscheinung analog sei dem Verschwinden der Bilder gefärbter Objecte, die auf weissem Grunde liegen

auf den Seitentheilen der Netzhaut, worauf wir in §. 23 zurückkommen werden. Es geschieht dies durch Ermüdung der Netzhaut. Auf der Eintrittsstelle des Sehnerven, meinte er, geschehe es nur sehr viel schneller und plötzlicher. Dagegen ist einzuwenden, dass ein helles Object, welches in dem ungesehenen Raume des Gesichtsfeldes plötzlich auftaucht, gar nicht wahrgenommen wird, also auch die Sehsinnsubstanz gar nicht reizt, also auch nicht ermüden kann.

Die oben gegebenen nothwendigen Folgerungen aus den Thatsachen stellte Referent im Jahre 1851 auf, und dehnte den Schluss, dass das objective Licht unfähig sei, die Sehnervenfasern zu afficiren, auch gleich auf die an der vorderen Fläche der Netzhaut verlaufenden Fasern aus. Da ein anatomischer Zusammenhang der Stäbchenschicht mit den Nervenelementen der Netzhaut damals noch nicht bekannt war, so blieb nur die Annahme, dass die Nervenzellen oder Körner der Netzhaut die lichtempfindlichen Elemente seien. Bald darauf entdeckte H. Müller die Radialfasern der Netzhaut, welche die Zapfen und Stäbchen mit den Elementen verbinden, Koelliker wies dieselben am Menschen nach, und beide schlossen daran die Vermuthung, dass die Elemente der Stäbchenschicht die lichtempfindlichen seien, für welche schliesslich von H. Müller auch der physiologische Beweis gegeben wurde. Dieselbe Ansicht war übrigens, freilich ohne genügende Kenntniss der mikroskopischen Elemente, früher von Treviranus aufgestellt worden, der die lichtempfindlichen Elemente Nervenpapillen nannte.

Die Genauigkeit des Sehens hat man viel untersucht seit der Zeit, wo man anfing Teleskope zu bauen. Hooke wendete gleich zuerst das richtige Princip an, indem er untersuchte, bei welchem Winkelabstande Doppelsterne als solche erkannt werden können. Die meisten folgenden Beobachter dagegen suchten nach der kleinsten Grösse eines schwarzen Flecks, der noch erkannt werden könnte, und erhielten natürlich sehr abweichende Resultate, so Hevelius, Smith, Jurin, Tob. Mayer, Courtivron, Muncke, Treviranus. Den Einfluss der Erleuchtung bei diesen Versuchen erkannten Jurin und Mayer. Ersterer glaubte die Thatsache, dass zwei Striche von einander zu trennen, erst bei einem grösseren Sehwinkel möglich sei, als jeden einzelnen von ihnen zu erkennen, daraus zu erklären, dass das Auge zitterte und deshalb die Bilder zweier Stäbe sich deckten. Die Gründe, warum nur die Trennung distincter Objecte ein constantes Maass geben kann, entwickelte Volkmann, und nach dieser Methode wurden Messungen von E. H. Weber, Bergmann, Marié Davy ausgeführt.

Blinder Fleck und Ort der lichtempfindlichen Schicht.

1668. Mariotte. *Oeuvres.* p. 496—516; ferner in *Mém. de l'Acad. de Paris 1669 et 1682. Phil. Transact.* II. 668. Acta Eruditorum 1683. p. 68.
1670. Pecquet. *Phil. Transact.* XIII. 171.
Perrault ibid. XIII. 265.
1694. De la Hire. *Accidens de la vue.*
1704. Mery. *Hist. de l'Acad. de Paris.* 1704.
1709. De la Hire ibid. 1709. p. 119. 1711. p. 102.
1728. D. Bernouilli. Comment. Petropol. vet. T. 1. p. 314.
1738. Smith. *Optics.* Cambridge 1738. Remarks. p. 6. (Deutsche Ausgabe 367.)
1740. Le Cat. *Traité des sens. Rouen.* p. 171, 17[illegible]—180.
1755. Zinn. *Descriptio oculi humani.* p. 37.
1757. Haller. Physiologia. T. V. p. 357, 474.
1759. Porterfield. *On the eye.* II. 252, 254.
1772. Michell in Priestley. Geschichte der Optik. 4. Per. 5. Abth. 2. Cap. (Deutsche Ausgabe. S. 149.)
1819. Purkinje. Beobachtungen und Versuche. I. 70 und 83.
1835. D. Brewster. Pogg. Ann. XXIX. 339.
G. R. Treviranus. Beiträge zur Aufklärung der Erscheinungen und Gesetze des organ. Lebens. Bremen.
1838. Griffin. *Contributions to the physiology of vision.* London medical gazette. 1838 Mai. p. 230.
1840. J. Müller. Handbuch der Physiologie. II. 370.
1844. Valentin. Lehrbuch der Physiologie. 1. Ausgabe II. 444.

1846. VOLKMANN. Art.: Sehen in WAGNER's Handwörterbuch der Physiol. III. 272.
1850. A. HANNOVER. Bidrag til Odets Anatomie, Physiologie og Pathologie. Kjöbenhavn. Cap. VI. p. 61.
1851. HELMHOLTZ. Beschreibung eines Augenspiegels. Berlin. S. 39.
1852. E. H. WEBER. Ueber den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge. Verhandl. der Leipz. Gesellsch. 1852. S. 138.
A. KOELLIKER zur Anatomie und Physiologie der Retina. Verhandl. d. phys. med. Ges. zu Würzburg. 3. Juli 1852.
DONDERS. Onderzoekingen gedaan in het physiol. Labor. d. Utrechtsche Hoogeschool. VI. 134.
1853. D. BREWSTER. *Account of a case of vision without retina. Report of the Brittish Assoc. at Belfast.* p. 3.
A. FICK und P. DU BOIS REYMOND. Ueber die unempfindliche Stelle der Netzhaut im menschlichen Auge. J. MÜLLER's Archiv für Anat. und Physiol. 1853. p. 396.
COCCIUS. Die Anwendung des Augenspiegels. Leipzig. S. 20.
1855. H. MÜLLER. Verhandl. d. phys. med. Ges. zu Würzburg. IV. 100. V. 411—446.
1856. *Derselbe. Anatomisch physiolog. Untersuchungen über die Retina bei Menschen und Thieren. SIEBOLD und KÖLLILER's Zeitschr. für wissensch. Zoologie. VIII. 1—122.
1857. AUBERT und FÖRSTER. Ueber den blinden Fleck und die scharfsehende Stelle im Auge. Berliner allg. med. Centralzeitung. 1857. No. 33. S. 259. 260.
1859. COCCIUS über Glaukom, Entzündung und die Autopsie mit dem Augenspiegel. Leipzig. S. 40 und 52.

Genauigkeit des Sehens.

1705. HOOKE *posthumous works.* p. 12, 97.
1738. SMITH. *Optics.* I. 31. (Uebersetzung S. 29.)
JURIN ibid. *Essay on distinct and indist. vision.* p. 149.
1752. COURTIVRON. *Hist. de l'Acad. de Paris.* p. 200.
1754. TOB. MAYER. Comment. Gotting. IV. 97 und 135.
1759. PORTERFIELD. *On the eye.* II. 58.
1824. AMICI in: *Ferussac bull. sc. math.* 1824. p. 221.
1829. LEHOT ibidem XII. 417.
1830. HOLKE. Disquis. de acie oculi dextri et sinistri. Lipsiae.
1831. EHRENBERG in Pogg. Ann. XXIV. 36.
1840. HUECK in J. MÜLLER's Archiv für Anat. und Physiol. 1840. S. 82.
J. MÜLLER. Handbuch der Physiologie. II. 82.
1841. BUROW. Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. Berlin. S. 38.
1846. VOLKMANN. Art.: Sehen in WAGNER's Handwörterbuch d. Physiol. III. 331, 335.
1849. MARIÉ DAVY. Institut. No. 790. p. 59.
1850. W. PETRIE. Institut. N. 886. p. 415.
1852. E. H. WEBER. Verhandl. der sächs. Ges. 1852. S. 145.
1857. BERGMANN in HENLE und PFEUFFER, Zeitschr. für rat. Med. (3.) II. 88.
AUBERT und FÖRSTER in GRAEFE, Archiv für Ophthalmologie III. Abth. 2. S. 1.

§. 19. Die einfachen Farben.

Wir gehen jetzt über zur Untersuchung der Empfindungen, welche verschiedenartiges Licht im Sehnervenapparat erregt. Es giebt, wie wir schon im §. 8 auseinandergesetzt haben, Licht von verschiedener Schwingungsdauer, welches sich ausserdem in physikalischer Beziehung durch seine Wellenlänge, seine Brechbarkeit und Absorptionsfähigkeit in gefärbten Mitteln unterscheidet. In physiologischer Beziehung unterscheidet sich Licht von verschiedener Schwingungsdauer im Allgemeinen dadurch, dass es im Auge die Empfindung verschiedener Farben erregt.

Alle Lichtquellen, welche wir kennen, entsenden gleichzeitig Licht von verschiedener Schwingungsdauer. Um aus solchem gemischten Lichte einfaches

Licht, d. h. Licht von einem einzigen Werthe der Schwingungsdauer auszusondern, ist die Brechung in durchsichtigen Prismen das vollkommenste Mittel. Wenn von einer entfernten Lichtquelle *a* (*Fig. 106*) einfaches blaues Licht durch ein Prisma *P* in das Auge des Beobachters *O* fällt, so werden die Lichtstrahlen im Prisma gebrochen, von ihrem früheren Wege abgelenkt, und der Beobachter erblickt daher das Bild der Lichtquelle verschoben in der Richtung, nach welcher der brechende Winkel *p* des Prisma gekehrt ist, etwa bei *b*, natürlich in der Farbe des Lichts, welches von *a* ausgegangen ist, hier also blau.



Fig. 106.

Fällt einfaches Licht anderer Brechbarkeit, etwa rothes, von *a* durch das Prisma in das Auge des Beobachters, so sieht er wieder ein Bild der Lichtquelle, jetzt roth, und weniger weit verschoben, als das blaue war, etwa bei *r*. Geht gleichzeitig rothes und blaues Licht von *a* aus, so sieht der Beobachter auch gleichzeitig das rothe Bild bei *r* und das blaue Bild bei *b*. Und geht endlich weisses Licht von *a* aus, welches sowohl rothes, als blaues, als auch Licht von allen anderen Stufen der Brechbarkeit enthält, so entspricht jeder einzelnen Farbe ein besonderes Bild der Lichtquelle, und zwar so, dass die Bilder der zwischen roth und blau liegenden Farben sich nach der Ordnung ihrer Brechbarkeit zwischen *r* und *b* einreihen. Sind sehr viele solche farbige Bilder zwischen *r* und *b* eingeschoben, und hat jedes eine gewisse Breite, die der Breite des leuchtenden Objects bei *a* nahehin gleich ist, so wird jedes einzelne farbige Bild einen Theil seiner Nachbarbilder verdecken. Auch ist leicht einzusehen, dass es desto weniger die Nachbarbilder decken und sich mit ihnen vermischen wird, je schmaler das leuchtende Object ist, und je schmaler daher auch jedes einzelne farbige Bild wird, verglichen mit der ganzen Länge des Spectrum *rb*. Wenn in dem von der Lichtquelle ausgehenden Lichte Strahlen von allen continuirlich in einander übergehenden Stufen der Brechbarkeit vorkommen, kann man zwar nicht vollständig verhindern, dass die nächst benachbarten Bilder der Lichtquelle sich decken, aber man kann die Lichtquelle und ihre Bilder so schmal machen, dass sich nur noch solche Bilder decken, welche Farben angehören, für welche die Unterschiede der Brechbarkeit verschwindend klein sind.

Wenn die Lichtquelle ein sehr feiner Spalt ist, durch den zusammengesetztes Licht fällt, so bildet jeder einzelne Punkt des Spaltes nach der eben gemachten Auseinandersetzung ein linienförmiges Spectrum. Das prismatische Bild des ganzen Spaltes erscheint demnach dem Beobachter als ein farbiges Rechteck, dessen der Lichtquelle zugekehrtes Ende roth, das entgegengesetzte violett ist. Dazwischen finden sich allmälig in einander übergehend eine Reihe anderer Farben, nämlich, vom Roth anfangend, zunächst Orange, dann Gelb, Grün, Blau, endlich Violett. Man nennt ein solches durch das Prisma mit getrennten Farben entworfenes Bild einer Lichtlinie ein prismatisches Spectrum, und

zwar ist es, nach der bisher beschriebenen Beobachtungsweise entworfen, ein subjectives Spectrum, da es nur einem virtuellen Bilde der Lichtquelle entspricht. Man kann es aber auch zu einem reellen Bilde machen, indem man hinter das Prisma da, wo sich bisher das Auge des Beobachters befand, eine Sammellinse aufstellt, welche die durch das Prisma gebrochenen Lichtstrahlen zu einem reellen Bilde von rb in oder hinter ihrem Brennpunkte vereinigt. So erhält man ein objectives Spectrum. Ein solches wird schon bei der ersten Beobachtungsweise auf der Netzhaut des Beobachters entworfen. Wenn das von der Lichtquelle ausgehende Licht alle continuirlich in einander übergehenden Grade der Brechbarkeit darbietet, ist, wie wir gesehen haben, auch das Spectrum eine continuirlich beleuchtete Fläche. Wenn aber von der Lichtquelle nur Licht von bestimmten einzelnen Werthen der Brechbarkeit ausgeht, so kann das Spectrum auch nur so viele einzelne verschiedenfarbige Bilder der Lichtquelle enthalten, als Grade der Brechbarkeit unter den Strahlen vorkommen, und man wird dann die Lichtquelle und ihre Bilder so schmal machen können, dass das jeder Farbe angehörige Bild von seinen Nachbarn durch einen dunkeln Zwischenraum getrennt ist. So haben wir vorher angenommen, dass nur rothes und blaues Licht in dem Lichte des Punktes *a Fig. 106* vorkäme, und gesehen, dass dann bei b ein blaues Bild, bei r ein rothes erscheint, beide durch den dunkeln Zwischenraum br von einander getrennt. Dasselbe ist natürlich der Fall, wenn nicht zwei, sondern zehn oder hundert oder tausend verschiedene Arten einfachen Lichtes in dem Lichte von a vorkommen.

Von dieser Art ist die Zusammensetzung des Sonnenlichts. Wenn wir ein möglichst vollkommenes Spectrum des Sonnenlichts herstellen, finden wir es von einer grossen Zahl dunkler Linien getheilt, den Fraunhofer'schen Linien, aus deren Vorhandensein wir schliessen müssen, dass gewisse Stufen der Brechbarkeit unter den Strahlen des Sonnenlichts nicht vorkommen. Je vollkommener die Trennung der Farben im Spectrum ist, desto grösser ist auch die Zahl der dunkeln Linien. Die stärksten von ihnen sind von Fraunhofer und von Stokes mit Buchstaben bezeichnet worden, weil sie ein ausserordentlich sicheres und bequemes Mittel abgeben, im Spectrum Strahlen von genau bestimmten Werthen der Schwingungsdauer und Brechbarkeit immer wieder zu finden, und wir werden uns deshalb im Folgenden auch dieser Bezeichnung bedienen, so oft es darauf ankommt, die Art einer Farbe genau zu bestimmen. Auf *Taf. V. Fig. 1* ist das Sonnenspectrum mit seinen dunkeln Linien abgebildet. Da die einzelnen Theile des Spectrums bei Prismen aus verschiedenen Stoffen verschiedenes Längenverhältniss haben, und wieder ein ganz anderes Verhältniss in den durch Diffraction erzeugten Spectren, wo die Vertheilung der Farben nur von ihrer Wellenlänge abhängt, so ist die Vertheilung der Farben in einer solchen Zeichnung bis zu einem gewissen Grade willkührlich. In unserer Abbildung ist die Anordnung, wie es für die physiologischen Betrachtungen am wichtigsten schien, nach dem Principe der musikalischen Scale getroffen, so dass Farben, deren Wellenlängen sich zu einander verhalten wie die zweier um ein halbes Tonintervall verschiedener Töne, überall gleich weit von einander entfernt sind. Mathematisch ausgedrückt, entsprechen also gleiche Distanzen in der Zeichnung

gleichen Unterschieden der Logarithmen der Schwingungsdauer. Die Ziffern auf der einen Seite bezeichnen die Anzahl der halben Tonintervalle, die Buchstaben auf der anderen bezeichnen die Namen der stärkeren dunkeln Linien, wie sie von Fraunhofer und Stokes gewählt worden sind.

Da in der Benennung der verschiedenen Farben einige Unsicherheit herrscht, wollen wir für das vorliegende Werk folgendes darüber festsetzen:

Roth nenne ich die Farbe des weniger brechbaren Endes des Spectrum, welche von der äussersten Grenze desselben bis etwa zur Linie *C* keine merkliche Aenderung des Farbentons zeigt. Der Repräsentant unter den Farbstoffen ist etwa der Zinnober. Von ihm zu unterscheiden ist das Purpurroth, welches in seinen weisslicheren Abstufungen Rosenroth wird und dem reinen Roth gegenüber bläulich erscheint. Dieser Farbenton, für dessen gesättigteste Abstufung wir den Namen Purpur bewahren wollen, während die röthlicheren Abstufungen desselben Karminroth heissen mögen, kommt im Spectrum nicht vor, sondern kann nur durch Mischung seiner äussersten Farben, des Roth und Violett, hervorgebracht werden.

Von der Linie *C* bis zur Linie *D* geht das Roth über durch Orange, d. h. Gelbroth mit überwiegendem Roth, in Goldgelb, d. h. Gelbroth mit überwiegendem Gelb. Ersterem entspricht unter den metallischen Farbstoffen etwa die Mennige, letzterem die Bleiglätte (Bleioxyd).

Von *D* bis zur Linie *b* hin finden wir sehr schnelle Farbenübergänge. Zunächst folgt ein sehr schmaler Strich reinen Gelbs, welcher etwa dreimal so weit von *E* als von *D* absteht. Dann folgt Grüngelb und zwischen *E* und *b* reines Grün. Für das reine Gelb und Grün haben wir zwei sehr gute Repräsentanten unter den Malerfarben, nämlich für ersteres das fein niedergeschlagene, hellere chromsaure Bleioxyd (Chromgelb) und für das letztere das arsenigsaure Kupferoxyd (Scheel'sches Grün).

Zwischen *E* und *F* geht das Grün durch Blaugrün in Blau über, zwischen *F* und *G* folgen verschiedene Töne des Blau. Wegen der verhältnissmässig grossen Breite der blauen Töne in dem durch Brechung erzeugten Spectrum des Sonnenlichts hat Newton hier verschiedene Namen angewendet, englisch: *blue* und *indico*, lateinisch der Reihe nach *thalassinum, cyaneum, coeruleum, indicum*, worauf dann Violett, *violaceum*, folgt. Wir können den Namen Indigblau beibehalten für die nach *G* hinliegenden zwei Drittheile des Raumes *FG*. Für das weniger brechbare Blau des ersten Drittels von *FG* hat man bisher meist einfach den Namen Blau angewendet, auch wohl unrichtig Himmelblau, aber die Aehnlichkeit mit dem Himmelblau bekömmt dieses Blau in einem Spectrum von bequemer Helligkeit nur durch die grössere Lichtstärke, während das Indigblau, dem der Farbenton des blauen Himmels angehört, in einem solchen Spectrum für diesen Vergleich zu dunkel erscheint. Da nun der gemeine Sprachgebrauch den reinen Himmel als den Hauptrepräsentanten des Blau betrachtet, und ihm den Namen des Blau bewahrt, wenn er es mit weniger brechbarem Blau vergleicht, und letzteres bei einem solchen Vergleiche als grünlich bezeichnet, so können wir im wissenschaftlichen Sprachgebrauche nicht wohl das letztere einfach als Blau im Gegensatz zum Indigblau bezeichnen, und ich habe deshalb den Namen Cyanblau

dafür gewählt mit Rücksicht auf die Bezeichnung *cyaneum* bei Newton für die grünlich blauen Töne des Spectrum. Zur Bezeichnung des Farbentons allein würde auch der Namen Wasserblau gut passen, denn grosse Massen sehr reinen Wassers (Genfer See, Gletschereis) zeigen in ihrem Innern in der That diese Farbe. Hat man z. B. längere Zeit in das Wasser des Genfer Sees an einem hellen Tage geblickt, und sieht zum Himmel auf, so erscheint dieser im Contrast violett, oder selbst rosaroth. Da indessen die Farbe der gewöhnlich gesehenen Wassermassen sehr weisslich ist, mit Ausnahme etwa tiefer Eisspalten, so ziehe ich vor, den Namen Wasserblau nur für die weisslichen Abstufungen des Cyanblau anzuwenden. Unter den Farbstoffen entspricht das Berliner Blau (Eisencyanürcyanid) dem Cyanblau, das Ultramarin dem Indigblau.

Jenseits der Linie *G* bis nach *H* oder *L* folgt Violett (Farbe der Veilchen); es ist von manchen Schriftstellern auch Purpur genannt worden. Violett und Purpur bilden den Uebergang der Farbentöne von Blau und Roth. Wir wollen, wie gesagt, den Namen Purpur nur auf die röthlicheren Farbentöne dieses Uebergangs anwenden, welche im Spectrum nicht vorkommen.

Schliesslich folgt als Ende des Spectrum auf der brechbarsten Seite das Ultraviolett. Dieser Theil von *L* bis zum Ende bei *R* kann nur gesehen werden, wenn die bisher beschriebenen helleren Theile des Spectrum sehr sorgfältig abgeblendet sind. Die Anwesenheit von Lichtstrahlen besonderer Art an dieser Stelle lernte man zuerst durch die chemischen Wirkungen derselben kennen, und nannte sie deshalb unsichtbare chemische Strahlen. In Wahrheit sind diese Strahlen aber nicht unsichtbar, wenn sie auch allerdings das Auge verhältnissmässig viel schwächer afficiren, als die Strahlen des mittleren leuchtenden Theils des Spectrum zwischen den Linien *B* und *H*. Sobald man die letzteren durch geeignete Apparate vollständig entfernt, sind die ultravioletten Strahlen dem Auge ohne Schwierigkeit sichtbar, und zwar bis zum Ende des Sonnenspectrum. Ihre Farbe ist bei geringer Lichtintensität indigblau, bei grösserer Intensität bläulich grau. Am leichtesten nachgewiesen wird die Anwesenheit dieser Strahlen durch das Phänomen der Fluorescenz. Beleuchtet man nämlich mit ultraviolettem Lichte eine klare Lösung von saurem schwefelsaurem Chinin, so geht von allen Punkten dieser Lösung, welche von dem ultravioletten Lichte getroffen werden, weiss bläuliches Licht nach allen Richtungen aus, welches etwa wie ein leuchtender Nebel erscheint, der die Lösung durchzieht. Untersucht man dies weiss bläuliche Licht mit dem Prisma, so erkennt man, dass es nicht ultraviolettes Licht ist, sondern gemischtes weissliches Licht mittlerer Brechbarkeit. Am einfachsten kann man die Erscheinung deshalb so beschreiben: So lange die ultravioletten Strahlen auf die Chininlösung wirken, ist diese selbstleuchtend, und sendet gemischtes weisslich blaues Licht von mittlerer Brechbarkeit aus. Da nun das Auge für Licht der letzteren Art ausserordentlich viel empfindlicher ist, als für ultraviolettes Licht, so nimmt es bei gewissen Graden der Lichtstärke von letzterem nicht das geringste wahr, bis es eine fluorescirende Substanz trifft, und auf dieser wird dann das bisher unsichtbare Licht sichtbar. Zu den Körpern, welche das Phänomen der Fluore-

scenz in hohem Grade zeigen, gehören ausser dem Chinin noch das mit Uran gefärbte Glas, das Aesculin, Kaliumplatincyanür u. s. w.

Da wir an den fluorescirenden Substanzen keine andere Veränderung bemerken, die Fluorescenz mag noch so oft hervorgerufen werden, da auch keine Wärme dabei zu verschwinden scheint, so müssen wir aus dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft schliessen, dass die lebendige Kraft des durch die Fluorescenz erzeugten Lichtes nicht grösser ist trotz seiner stärkeren Wirkung auf das Auge, als die des einfallenden ultravioletten Lichts. Genaue Untersuchungen über das Verhältniss der Helligkeit des durch Fluorescenz veränderten und unveränderten ultravioletten Lichts sind noch nicht angestellt. Doch kann man aus gewissen Thatsachen, die später bei Beschreibung der Methoden erwähnt werden sollen, schliessen, dass das erstere etwa 1200 Mal heller ist als das letztere. Davon, dass die Helligkeit beider Lichter für das Auge wirklich ausserordentlich verschieden sei, überzeugt man sich auch ohne Messung, wenn man ultraviolettes Licht, welches von allem brechbareren Lichte gehörig gereinigt und in einen Focus vereinigt ist, erst auf einen nicht fluorescirenden Schirm, z. B. weisses Porzellan, und dann auf Chinin fallen lässt. Dass das Sonnenspectrum, wenigstens nachdem das Sonnenlicht durch die Atmosphäre gegangen ist, wirklich nicht weiter reicht, als das Auge bei geeigneter Abblendung des helleren Lichts ultraviolettes Licht wahrnimmt, folgt daraus, dass auch, wenn man durch Quarzprismen und Quarzlinsen ein objectives Spectrum auf eine Chininlösung oder einen anderen fluorescirenden Körper wirft, das Phänomen der Fluorescenz nur genau ebenso weit auftritt, als das Auge ultraviolettes Licht wahrnehmen kann. Andererseits aber hat Stokes gefunden, dass das Spectrum des elektrischen Kohlenlichts, durch Quarzapparate auf einen fluorescirenden Schirm geworfen, viel weiter reicht als das Sonnenspectrum. Seine Methode ist also in der That geeignet, auch noch brechbareres Licht sichtbar zu machen, als das Sonnenlicht enthält, und wir müssen daraus schliessen, dass das Spectrum des durch die Atmosphäre gegangenen Sonnenlichts wirklich da aufhört, wo das Auge und die fluorescirenden Körper die Grenze anzeigen. Ueber die Sichtbarkeit der brechbarsten Theile des elektrischen Kohlenlichts sind noch keine Versuche angestellt worden. Der Lichtbogen, welchen die magnetelektrisch inducirten Ströme der Neef'schen Hammerapparate im luftleeren Raume geben, ist zwar verhältnissmässig reich an ultraviolettem Licht, verglichen mit der geringen Menge weniger brechbaren Lichtes, welches er enthält, aber seine absolute Lichtstärke ist doch zu gering, um eine feinere prismatische Zerlegung zu gestatten.

Auch am anderen Ende des Spectrum gelingt es bei sorgfältiger Abblendung des helleren gewöhnlich sichtbaren Lichts Theile des Spectrum sichtbar zu machen, die für gewöhnlich unsichtbar bleiben. Genügende Abblendung ist hier sehr leicht durch ein rothes Glas, welches man in den Weg der Lichtstrahlen einschiebt, zu erreichen. Oder da die rothen (mit Kupferoxydul gefärbten) Gläser viel Orange durchlassen, kann man nöthigenfalls zu dem rothen Glase noch ein blaues, mit Kobaltoxyd gefärbtes fügen, welche Orange absorbiren, aber das äusserste Roth ungeschwächt durchlassen. Aber es ist wenig, was man am rothen Ende durch eine solche Beobachtungsweise gewinnt, verglichen

mit der grossen Ausdehnung des ultravioletten Spectrum. Der Streifen rothen Lichts, welcher jenseits der Linie *A* hinzukommt, hat etwa die Breite des Abstandes *AB*. Der Farbenton des Roth ist bis zum äussersten Ende hin unverändert, und nähert sich keineswegs dem Purpur.

Am rothen Ende reicht nun aber in der That das Sonnenspectrum weiter, als es vom Auge wahrgenommen wird. Bisher hat man die Anwesenheit solcher überrothen Strahlen nur durch ihre Wärmewirkungen wahrnehmbar machen können, und sie deshalb **dunkle Wärmestrahlen** genannt. Da sie vom Glase, Wasser und vielen anderen durchsichtigen Substanzen stärker als die leuchtenden Strahlen absorbirt werden, so muss man Steinsalzprismen und Steinsalzlinsen anwenden, um die ganze Ausdehnung des dunkeln Wärmespectrum kennen zu lernen. Im prismatischen Spectrum ist die Breite des dunkeln Wärmespectrum jedenfalls eine beschränkte, weil nämlich, der Theorie der elastischen Aetherschwingungen gemäss, bei zunehmender Wellenlänge der Strahlen die Brechung sich einem Minimum nähert, welches nicht überschritten werden kann, und bei welchem die Dispersion der Farben aufhört. In *Fig. 107* sind als horizontale Abscissen die Wellenlängen aufgetragen, und zwar von einem Anfangspunkte an gerechnet, der von *H* ebenso weit entfernt liegt wie der Punkt *b*, aber in der Verlängerung der Linie *bH*. Die Buchstaben *B* bis *H* entsprechen den FRAUNHOFER'schen Linien und ihrer Stellung in einem Interferenzspectrum. Als verticale Coordinaten sind die Brechungsverhältnisse für eines der von FRAUNHOFER benutzten Flintglasprismen aufgetragen.

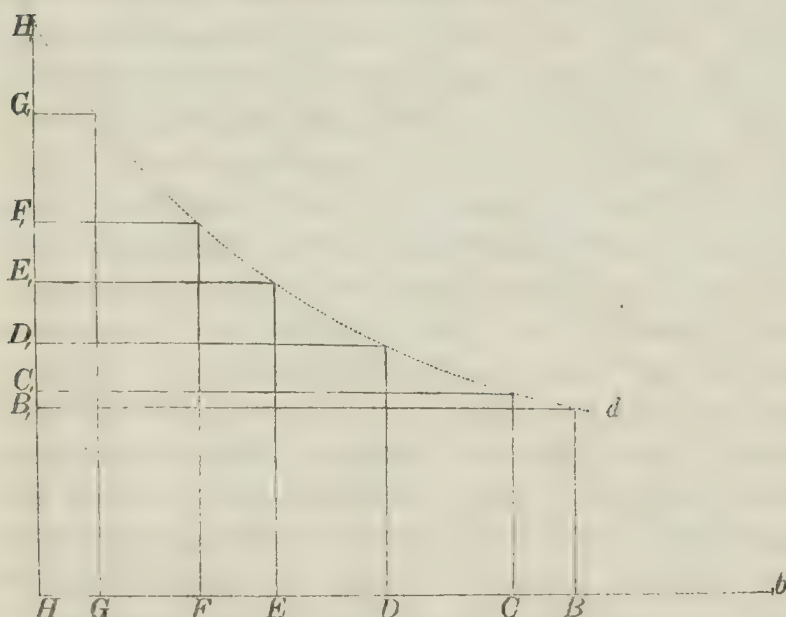


Fig. 107.

Linie	B	C	D	E	F	G	H
Brechungsverhältniss	1,6277	1,6297	1,6350	1,6420	1,6483	1,6603	1,6714

Die Buchstaben $B_{,}$ bis $H_{,}$ bezeichnen die Stellung der dunkeln Linien in dem Spectrum dieses Flintglases. Die Grundlinie *Hb* entspricht dem Brechungsverhältniss 1,6070, welches für diese Glasart das Minimum ist, dem sich bei steigender Wellenlänge die Brechungsverhältnisse asymptotisch nähern müssen [1]. Die punktirte Curve $H_{,}d$ drückt also die Brechbarkeit der Strahlen als Function der Wellenlänge aus, sie würde bei weiterer Fortsetzung sich

[1] Der Werth dieses Minimum ist nach der Berechnung von BADEN POWELL (Pogg. XXXVII) genommen worden, dessen Interpolationsformel nahe genug mit den theoretisch abgeleiteten Formeln von CAUCHY übereinstimmt

asymptotisch der Grundlinie *Hb* anschliessen. Daraus folgt, dass, wenn wir uns das Brechungsspectrum $H_{\prime}B_{\prime}$ über sein rothes Ende bei $B_{\prime}$ fortgesetzt denken durch dunkle Wärmestrahlen, das Spectrum seine äusserste Grenze an der Grundlinie bei *H* finden muss [1], welche von *B*, dem Ende des gewöhnlich sichtbaren Roth, ungefähr so weit absteht, wie *B* von *F*, der Grenze zwischen Grün und Blau, eine Entfernung, die ungefähr der Hälfte der Länge des gewöhnlich sichtbaren Spectrum entspricht. Uebrigens fällt es in der *Fig. 107* leicht auf, wie in dem Brechungspectrum $B_{\prime}H_{\prime}$, wenn man es mit dem Interferenzspectrum *BH* vergleicht, die Strahlen des blauen Endes $F_{\prime}G_{\prime}H_{\prime}$ auseinandergezogen, die die des rothen Endes $B_{\prime}C_{\prime}D_{\prime}$ aneinandergedrängt sind. Dieses Zusammendrängen der Strahlen im Brechungsspectrum muss natürlich zunehmen, je mehr man sich im Raum der dunkeln Wärmestrahlen der Grenze nähert. Am blauen Ende, wo das Spectrum gedehnt ist, wird dabei die Zahl der sichtbaren dunkeln Linien grösser, und weil die gleiche Quantität Licht oder Wärme über einen grösseren Raum verbreitet ist, werden Helligkeit und Erwärmung geringer. Umgekehrt am rothen Ende wird die Zahl der sichtbaren dunkeln Linien geringer, Helligkeit und Erwärmung grösser, als in dem Interferenzspectrum. Wenn also auch das Wärmemaximum im prismatischen Spectrum ausserhalb des Roth liegt, so folgt daraus nicht, dass die dunkeln Wärmestrahlen der betreffenden Wellenlänge in grösserer Menge im Sonnenlicht vorhanden seien, als irgend eine Art leuchtender Strahlen; im Gegentheil scheint im Interferenzspectrum das Wärmemaximum auf Gelb zu fallen.

Die Bestimmung der grössten Wellenlängen, welche in den dunkeln Wärmestrahlen des Sonnenlichts vorkommen, ist äusserst schwierig, eben wegen der beschriebenen Eigenthümlichkeiten des Brechungsspectrum. Für diejenigen, welche durch Flintglas gehen, hat Fizeau die grösste Wellenlänge nach einer Methode, die keine wesentlichen Einwände zulässt, gefunden gleich 0,001940 Mm. Es ist dies mehr als die doppelte Wellenlänge der äussersten rothen Strahlen, die nach meinen Messungen 0,00084 Mm. beträgt. Es zeigen übrigens diese dunkeln Wärmestrahlen die Erscheinungen der Interferenz, wie die Lichtstrahlen, woraus folgt, dass sie wie diese in einer schwingenden Bewegung bestehen; sie zeigen genau dieselben Gesetze der Polarisation, woraus folgt, dass auch in ihnen die Schwingungsrichtung senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung ist, und unterscheiden sich also von den leuchtenden Strahlen nur durch ihre grössere Wellenlänge und die damit verbundene geringere Brechbarkeit.

Der Grund für die Unsichtbarkeit der überrothen Strahlen könnte entweder darin zu finden sein, dass sie von den Augenmedien absorbirt werden, oder dass die Netzhaut für sie nicht empfindlich ist. Dass Wasser die dunkeln Wärmestrahlen in hohem Masse absorbirt, hat schon Melloni nachgewiesen. Mit den durchsichtigen Mitteln des Ochsenauges haben Brücke und Knoblauch Versuche angestellt. Es wurden nämlich Hornhaut, Glaskörper und Linse eines Ochsenauges in eine passende röhrenförmige Fassung so eingeschaltet, dass Hornhaut

[1] Diese Grenze scheint nach einer Bemerkung von Fr. Eisenlohr in den Versuchen von Melloni wirklich erreicht zu sein. Kritische Zeitschr. für Chemie. Erlangen 1858. S. 229.

und Linse die vordere und hintere Begrenzung bildeten, der Glaskörper zwischen beiden lag. Durch dieses vollkommen durchsichtige System fiel Sonnenlicht, von einem Heliostaten in ein dunkles Zimmer geworfen, auf eine thermoelektrische Säule. Es brachte eine Ablenkung des damit verbundenen Multiplicators von 26 bis 30° hervor. Nachdem aber die beiden Seiten des Auges über einer Terpenthinflamme berusst waren, was vollkommen gut und, wie die nachherige Untersuchung zeigte, ohne alle sonstige Veränderung der Hornhaut und Linse gelang, konnte keine Wärme mehr durch das Auge hindurchstrahlen. Russschichten sind aber für die dunkeln Wärmestrahlen durchgängig, nicht für die leuchtenden. Hätte also ein Theil der durch die Augenmedien gehenden Strahlen aus dunkeln Wärmestrahlen bestanden, so hätte sich von diesen auch noch nach der Berussung eine Wirkung zeigen müssen. Es lässt sich durch diesen Versuch allerdings nicht genau nachweisen, dass die Grenzen der Sichtbarkeit des Roth mit den Grenzen der Diathermansie der Augenmedien zusammentreffen, aber jedenfalls steht fest, dass von den unsichtbaren überrothen Strahlen wenig oder nichts mehr zur Netzhaut gelangen kann, und es scheint dieser Umstand zu genügen, um ihre Unsichtbarkeit zu erklären.

Cima [1] hat ähnliche Versuche angestellt, wobei er als Wärmequelle eine Locatellische Lampe benutzte, deren Strahlen durch die Augenmedien auf eine thermoelektrische Säule fielen. Er fand, dass die Krystalllinse 13 Procent, der Glaskörper allein 9 % und das ganze Auge auch 9 % der einfallenden Wärme durchliess.

Dass die übervioletten Strahlen die Augenmedien durchdringen können, folgt direct schon aus der Möglichkeit, das überviolette Spectrum mit seinen dunkeln Linien zu sehen. Donders und Rees haben objectiv nachgewiesen, dass diese Strahlen durch Glasgefässe, welche mit Glasfeuchtigkeit vom Ochsen gefüllt waren, und in die auch Hornhaut und Linse eingebracht wurden, ohne auffallend geschwächt zu werden, hindurchgehen. Um das ultraviolette Licht nach dem Durchgange durch die Augenflüssigkeiten sichtbar zu machen, fingen sie es auf der Fläche einer Chininlösung auf, wo es die blaue Fluorescenz hervorrief. Brücke hatte ähnliche Versuche schon früher angestellt, bei denen er die Wirkung des Lichts auf Guajaklösung und auf photographisches Papier untersuchte, nachdem es durch die Augenmedien gegangen war.

Guajakharz, frisch aus der alkoholischen Lösung durch Eintrocknen im Dunkeln gewonnen, wird von den blauen, violetten und übervioletten Strahlen blau gefärbt, von den schwächer brechbaren wieder entbläut. Im gewöhnlichen Tageslichte überwiegt die Wirkung der bläuenden Strahlen. Tageslicht aber, welches durch die Krystalllinse eines Ochsenauges gegangen ist, färbt das Harz nur gelbgrün, und eine schon gebläute Harzschicht wird durch dasselbe Licht wieder bis zu demselben Gelbgrün entbläut. Daraus folgt, dass die Linse die bläuenden Strahlen des Tageslichts stärker absorbirt, als die nicht bläuenden. Bei starker Absorption der gewöhnlich sichtbaren blauen und violetten Strahlen müsste die Linse selbst gelblich gefärbt erscheinen. Da sie im normalen Zu-

---

[1] *Sul potere degli umori dell' occhio a trasmettere il calorico raggionante.* Torino 1852.

stande ziemlich ungefärbt erscheint, so können es unter den Guajak bläuenden Strahlen nur die übervioletten sein, welche die Linse verhältnissmässig beträchtlich absorbirt. Für die Hornhaut und den Glaskörper ergeben ähnliche Versuche von Brücke, dass sie eine ähnliche Wirkung wie die Linse, aber in viel schwächerem Grade besitzen. Damit stimmt überein, dass die Hornhaut und Linse des Auges, wie man auch am lebenden Auge leicht sehen kann, selbst einen ziemlichen Grad von Fluorescenz besitzen, wenn violettes oder übervioletttes Licht auf sie fällt. Sie strahlen dabei weissblaues Licht aus, ähnlich dem der Chininlösungen. Fluorescirende Körper aber absorbiren stets merklich die Strahlen, durch welche ihre Fluorescenz erregt wird.

Andere Versuche wurden von Brücke mit photographischem Papier von G. Karsten angestellt. Hornhaut, Glaskörper und Linse waren wie bei den erwähnten thermoelektrischen Versuchen in eine Messingfassung gebracht. Er liess die Strahlen eines prismatischen Sonnenspectrum hindurchgehen, und brachte das lichtempfindliche Papier im Brennpunkte der Augenmedien an Violette Strahlen gaben nach $1\frac{1}{2}$ Minuten einen völlig schwarzen Punkt. In der Nähe der Liniengruppe M (nach Draper) verschwand die Wirkung auf das Papier ganz, so dass selbst nach 10 Minuten keine sichtbare Wirkung mehr zu erkennen war. Dabei ist indessen zu bemerken, dass auch ohne Einschaltung der Augenmedien die photographische Wirkung der übervioletten Strahlen bei den meisten lichtempfindlichen Präparaten gegen das Ende des Spectrum schnell abnimmt. Die seit den beschriebenen Versuchen von Brücke entdeckte Fluorescenz ist namentlich für die brechbarsten Strahlen ein viel empfindlicheres Mittel der Wahrnehmung, als die photographische Wirkung, und wir haben mit ihrer Hülfe das Spectrum in viel grösserer Ausdehnung kennen gelernt als früher. Ja, selbst die directe Beobachtung mit dem Auge bei gehörig abgeblendetem Licht der helleren Theile des Spectrum scheint die Ausdehnung des übervioletten Spectrum besser kennen zu lehren, als die photographischen Darstellungen des Ueberviolett es thun.

Wenn nun auch die Versuche von Brücke lehren, dass die ultravioletten Strahlen beim Durchgang durch die Augenmedien, namentlich die Krystalllinse, merklich geschwächt werden, wie namentlich bei der Wirkung auf Guajaktinctur sich zu erkennen giebt, so lehren andererseits doch die Versuche von Donders, dass diese Schwächung nicht so bedeutend ist, um bei der gewöhnlichen Vergleichung der Helligkeit durch das ununterstützte Auge aufzufallen. Andererseits ist schon oben angeführt worden, dass die Helligkeit des unveränderten ultravioletten Lichts gegen die des ungefähr gleich aussehenden durch Fluorescenz des Chinin erzeugten Lichts sich etwa wie 1 : 1200 verhält. Daraus schliessen wir, dass Absorption des Lichts in den Augenmedien nur zum allerkleinsten Theile Schuld sein kann an der geringen subjectiven Helligkeit des Ultraviolett, dass diese vielmehr in der Unempfindlichkeit der Netzhaut ihren Grund haben muss.

Zu erwähnen ist noch, dass der Farbeneindruck, welchen einfaches Licht im Auge hervorruft, abhängig ist von der Lichtintensität, in der Weise, dass alle einfachen Farben bei gesteigerter Helligkeit sich dem Weiss oder Weissgelb nähern. Am leichtesten geschieht dies mit dem Violett, welches sich desto mehr vom Blau entfernt und dem Purpur nähert, je lichtschwächer es ist, und im Gegentheil bei einem mässigen Grade von Helligkeit, wie ihn das Spectrum der Sonne im Fernrohr leicht erreicht, schon weissgrau erscheint, und nur einen schwachen bläulich violetten Schein behält. Nach einer Beobachtung von

Moser sieht man dies auch sehr gut, wenn man bei halb bewölktem Himmel sich die Sonne mit einem ziemlich dunkeln violetten Glase bedeckt. Dann erscheint die Sonnenscheibe, durch das Glas gesehen, vollständig ebenso weiss, wie, neben dem Glase vorbei gesehen, die hellbeleuchteten Wolken erscheinen. Ebenso wird das Blau des Spectrum bei geringer Helligkeit mehr indigblau, bei grösserer himmelblau, und bei noch grösserer, welche übrigens immer noch ohne Belästigung des Auges zu ertragen ist, weissblau, endlich weiss. Daher die oben erwähnte fälschliche Anwendung der Benennung Himmelblau für das brechbarere und gleichzeitig lichtstärkere Cyanblau des Spectrum. Das Grün geht durch Gelbgrün in Weiss, Gelb direct in Weiss über, aber erst bei blendender Helligkeit. Roth zeigt die Erscheinung am schwersten, und nur bei den höchsten Graden der Helligeit habe ich es sowohl im Spectrum, als durch ein rothes Glas nach der Sonne blickend, hellgelb werden sehen. Alle diese Versuche gelingen gleich gut mit sorgfältig gereinigtem einfachen, wie mit gemischtem Lichte von der betreffenden Farbe, wie es durch gefärbte Gläser gegeben wird.

Unter allen Theilen des Spectrum ist der Farbenton des violetten und übervioletten Lichts am veränderlichsten bei veränderter Lichtstärke. Um Farbentöne des brechbarsten Endes mit einander zu vergleichen, muss man sie nahe auf gleiche Intensität bringen. Bei schwacher Helligkeit nähern sich die blauen Töne des Spectrum mehr dem Indigo, das Violett dem Rosa, wie schon angegeben wurde; etwa von der Linie L ab bis zum Ende des Spectrum findet aber eine Umkehr in der Reihe der Farben statt; der Farbenton wird nämlich nicht weiter dem Rosa ähnlicher, sondern kehrt von hier wieder zum Indigblau zurück. Bei mässiger Steigerung der Lichtstärke dagegen erscheint das überviolette Licht bläulich weissgrau, weisslicher als gleich starkes indigblaues Licht, und man hat es deshalb auch lavendelgrau genannt.

Die Umkehr in der Farbenreihe, welche das überviolette Licht bei geringer Helligkeit zeigt, beruht wahrscheinlich nicht auf der Reactionsweise des Nervenapparats, sondern scheint dadurch bedingt zu sein, dass die Netzhaut selbst fluorescirt, d. h. unter der Einwirkung übervioletter Strahlen Licht niederer Brechbarkeit, und zwar solches von grünlich weisser Farbe aussendet. Wenigstens die Netzhaut aus dem Auge einer Leiche, welche ich selbst [1] untersuchte, und die Netzhäute aus ganz frischen Augen von eben getödteten Ochsen und Kaninchen, welche Setschenow [2] untersuchte, zeigten einen freilich sehr geringen Grad von Fluorescenz, und das Licht, welches sie dabei aussandten, hatte die angegebene Farbe. Die Stärke ihrer Fluorescenz war geringer, als die von Papier, Leinwand und Elfenbein, aber erschien doch immer noch stark genug, um die Farbe, in der das überviolette Licht empfunden wird, verändern zu können. Ich verglich zu diesem Ende das Licht, was durch Fluorescenz der Netzhaut erzeugt wurde, und sich von den fluorescirenden Stellen dieser Membran nach allen Seiten in den Raum hinein verbreitete, mit ultraviolettem Licht, welches diffus von einem weissen Porzellanplättchen reflectirt wurde, also ebenso wie jenes

[1] Pogg. Ann. XCIV. 205.
[2] Graefe Archiv für Ophthalmologie. Bd. V. Abth. 2. S. 205.

sich nach allen Seiten in den Raum hinein verbreitete. Die Netzhaut und das Porzellanplättchen wurden durch ein schwach brechendes Prisma angesehen, welches das veränderte von dem unveränderten ultravioletten Lichte schied. Es erschien unter diesen Umständen das durch Fluorescenz in der Netzhaut erzeugte Licht ungefähr ebenso hell, wie die unveränderte ultraviolette Beleuchtung der Porzellanplatte. Wenn wir nun annehmen, was unbedenklich erscheint, dass die Netzhaut das in ihrer eigenen Substanz durch Fluorescenz erzeugte Licht empfindet, so muss ihre Empfindung bei überviolетter Bestrahlung zu ziemlich gleichen Theilen zusammengesetzt sein aus derjenigen Empfindung, die das überviolette Licht direct erregt, und derjenigen, welche das der Fluorescenz erregt. Da nun das letztere weisser und mehr grünlich ist, als das überviolette Licht dem Auge erscheint, so muss die directe Empfindung des überviolетten Lichts, wie sie sein würde in einer nicht fluorescirenden Netzhaut, dem reinen Violett ähnlicher sein. Denn Violett und Grünlich-Weiss würde bei passender Mischung das Lavendelgrau der überviolетten Strahlen geben können. Da die Farbe der Fluorescenz der Netzhaut von Lavendelgrau beträchtlich abweicht, können wir nicht annehmen, dass eine directe Reizung des Sehnervenapparats durch das überviolette Licht ganz fehlt, und etwa nur das fluorescirende Licht der Netzhaut empfunden würde.

Wenn man ein prismatisches Spectrum von geringer Länge betrachtet, so dass man das Ganze gleichzeitig vor Augen hat, so erscheint es nur aus vier Farbenstreifen zusammengesetzt: Roth, Grün, Blau und Violett, während durch den Contrast mit diesen Hauptfarben ihre Uebergänge fast ganz verschwinden, höchstens erkennt man noch, dass das Grün an der Seite des Roth gelblich wird. Noch verstärkt wird die Trennung der Farben dadurch, dass drei von den stärkeren dunkeln Linien des Sonnenspectrum *D*, *F* und *G* ungefähr den Grenzen der genannten vier Farben entsprechen. Aber auch, wenn man die Linien nicht erkennen kann, tritt dieselbe Scheidung der Farben ein. Bei längeren Spectris gelingt es zwar eher die Uebergangsfarben zu erkennen, indessen wird doch immer der Eindruck im Auge durch die Nachbarschaft von so lebhaften und gesättigten Farben, wie sie das Spectrum zeigt, beträchtlich verändert, so dass die Uebergangsfarben nicht recht ungestört zur Erscheinung kommen. Um die Reihe der einfachen Farben genau kennen zu lernen, muss man sie isoliren. Zu dem Ende entwirft man ein recht reines objectives Spectrum auf einem Schirme, der einen schmalen Spalt hat, so dass nur ein schmaler Farbenstreifen des Spectrum durch den Spalt dringen und einen dahinter aufgestellten weissen Schirm erleuchten kann. Indem man den Spalt langsam die Länge des Spectrum durchwandern lässt, bekommt man nach einander die Reihe der Farbentöne, die es enthält, einzeln zur Anschauung. Dabei zeigt sich, dass nirgends ein Sprung in der Farbenreihe ist, sondern die Farbentöne continuirlich in einander übergehen. Es ist dieser Versuch gleichzeitig eines der prachtvollsten Schauspiele, welches die Optik darbietet, wegen des Reichthums, der intensiven Sättigung und der zarten Uebergänge der Farbentöne.

Wegen der allmäligen Uebergänge ist es auch unmöglich, den einzelnen Farben im Spectrum naturgemäss eine bestimmte Breite anzuweisen. Um die

Stelle und Vertheilung der Farben, so weit es möglich ist, zu bezeichnen, will ich hier die den FRAUNHOFER'schen Linien entsprechenden Farbentöne hersetzen mit ihren Wellenlängen, letztere ausgedrückt durch Hunderttausendtheile eines Millimeters:

Linie.	Wellenlänge.	Farbe.
A.	7617	Aeusserstes Roth
B.	6878	Roth.
C.	6564	Grenze des Roth und Orange.
D.	5888	Goldgelb.
E.	5260	Grün.
F.	4843	Cyanblau.
G.	4291	Grenze des Indigo und Violett.
H.	3929	Grenze des Violett.
L.	3824	Ueberviolett.
M.	3741	
N.	3532	
O.	3383	
P.	3307	
Q.	3243	
R.	3108	

Da der Unterschied der Farbenempfindung im Auge wie der der Tonhöhe im Ohre dem Unterschiede in der Schwingungsdauer der erregenden Licht- oder Tonwellen entspricht, so hat man vielfältig versucht, die Farbenstufen des Spectrum nach demselben Principe abzutheilen, wie es bei den ganzen und halben Tönen in der musikalischen Tonleiter geschieht. NEWTON versuchte es zuerst. Da er aber noch nicht die Abhängigkeit der Breite, welche die einzelnen Farben im prismatischen Spectrum einnehmen, von der Natur der brechenden Substanz kannte, und der damals noch sehr unentwickelten Undulationstheorie des Lichtes abgeneigt war, so theilte er unmittelbar das Spectrum von Glasprismen, so weit er es kannte, ungefähr zwischen den Linien *B* und *H*, in 7 Streifen ein, deren Breite dem Verhältnisse der Intervalle in einer Tonleiter, d. h. den Zahlen $\frac{9}{8}$, $\frac{16}{15}$, $\frac{10}{9}$, $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$, $\frac{16}{15}$, $\frac{9}{8}$, proportional war, und unterschied, diesen sieben Intervallen entsprechend, sieben Hauptfarben, nämlich: Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. Dass in dieser Reihe zwei Arten des Blau genannt sind, während Goldgelb, Gelbgrün, Meergrün fehlen, die dem Auge von den benachbarten Hauptfarben mindestens ebenso gut verschieden erscheinen, wie Indigo von Cyanblau und Violett, rührt von der auf Seite 230 erwähnten Eigenthümlichkeit der Brechungsverhältnisse in den durchsichtigen Substanzen her, vermöge deren in jedem prismatischen Spectrum die brechbareren Farbentöne stärker ausgedehnt werden, als die weniger brechbaren. In den Interferenzspectris, wo die Vertheilung der Farben nur von der Wellenlänge, nicht von der Natur eines brechenden Medium abhängt, ist der blauviolette Raum viel schmaler, und würde bei einer ähnlichen Eintheilung nicht in drei Streifen

zerfallen sein, dagegen der Raum des Roth und Orange etwa drei eingenommen hätte.

Wenn wir jetzt mit Hülfe der seitdem gemachten Entdeckungen und Messungen das Spectrum eintheilen, indem wir das Eintheilungsprincip der musikalischen Tonleiter auf die Schwingungsdauer der Lichtwellen anwenden, wie es in *Taf. IV. Fig. 1* geschehen ist, und das Gelb dem Grundtone *c*, die Linie *A* dem tieferen *G* entsprechend machen, so bekommen wir für die einzelnen halben Töne folgende Farbenstufen:

Fis.	Ende des Roth	*fis.*	Violett
G.	Roth	*g.*	Ueberviolett
Gis.	Roth	*gis.*	Ueberviolett
A.	Roth	*a.*	Ueberviolett
B.	Rothorange	*b.*	Ueberviolett
H.	Orange	*h.*	Ende des Sonnenspectrum
c.	Gelb		
cis.	Grün		
d.	Grünblau		
dis.	Cyanblau		
e.	Indigblau		
f.	Violett.		

Die Töne, welche Octaven bilden, sind neben einander gestellt. In *Taf. IV. Fig. 1* sind rechts die den Tonintervallen entsprechenden Stellen durch Linien bezeichnet. Nach demselben Princip berechnet, würde die Grenze des Wärmespectrum nach Fizeau und Foucault etwa bei dem Dis_{-1} (zwei Octaven unter dem Cyanblau) und wenn man die Annäherungsformel von Cauchy für die Berechnung der Wellenlänge aus der Brechbarkeit so weit ausdehnen darf, die äusserste Grenze des elektrischen Kohlenlichts bei $\overline{h}$, eine Octave höher als die Grenze des Sonnenspectrum liegen.

Aus der gegebenen Vergleichungstafel der halben Töne und Farbenstufen geht nun hervor, dass an beiden Grenzen des Spectrum die Farbe sich innerhalb mehrerer halber Tonstufen nicht merklich ändert, in der Mitte dagegen die sehr mannigfaltigen Uebergangsfarben des Gelb in Grün alle in die Breite eines einzigen halben Tones zusammengedrängt sind. Daraus folgt, dass in der Mitte des Spectrum das Auge für die Aenderung der Schwingungsdauer des Lichtes viel empfindlicher ist, als an den Enden des Spectrum, und dass die Farbenstufen ihrer Grösse nach keineswegs in ähnlicher Weise von der Schwingungsdauer abhängen, wie die Abstufungen der Tonhöhe.

Da die vorliegenden physiologischen Untersuchungen eine viel genauere Scheidung des einfachen Lichts von einander nothwendig machen, als es bei physikalischen Untersuchungen im Allgemeinen erfordert wird, will ich hier die Theorie der Brechung in Prismen untersuchen, so weit sie für die Herstellung reiner Spectra nöthig ist. Man hat bisher, so viel ich gefunden habe, immer nur die Brechung einzelner Lichtstrahlen in den Prismen untersucht, aber nicht die Lage und Beschaffenheit der prismatischen Bilder, und doch, wenn man mit dem Auge durch ein Prisma sieht, oder das aus dem Prisma tretende Licht durch Linsen und Fern-

röhre gehen lässt, kommt es wesentlich darauf an, die prismatischen Bilder für jede Art homogenen Lichtes zu kennen, denn sie sind dann als die Objecte zu betrachten für die weiteren optischen Bilder, welche die Augenmedien und Linsen entwerfen. Um diese Lücke auszufüllen, werde ich im Folgenden daran gehen, den Ort und die Beschaffenheit des prismatischen Bildes zu bestimmen, wenn auch diese Untersuchung nicht eigentlich in die physiologische Optik gehört. Wohl aber sind ihre Resultate wichtig für jeden, der reine prismatische Spectra herstellen will.

Im Allgemeinen sind homocentrische Strahlen, nachdem sie durch ein Prisma gebrochen worden sind, nicht mehr homocentrisch, sondern ein jedes unendlich dünne Strahlenbündel hat zwei Vereinigungsweiten der Strahlen, ähnlich wie es bei homocentrischen Strahlen der Fall ist, welche von ellipsoidischen Flächen, oder bei schiefem Einfall von Kugelflächen gebrochen sind [1]. Um die Betrachtung dieser Verhältnisse zu erleichtern, will ich eine Form des Brechungsgesetzes benutzen, welche bald nach seiner Entdeckung durch FERMAT aufgefunden wurde, und welche es namentlich für die Untersuchung solcher Fälle bequem macht, bei denen die einzelnen Theile desselben Strahls nicht alle in einer Ebene liegen.

Definition. Wenn ein Strahl durch verschiedene brechende Mittel hindurchgeht, und man die Länge seines Weges in jedem einzelnen Mittel mit dem Brechungsverhältnisse dieses Mittels multiplicirt, und alle diese Längen addirt, so nenne ich die Summe die optische Länge des Strahls.

Es seien r_1, r_2, r_3 u. s. w. die Weglängen des Strahls im ersten, zweiten, dritten Mittel, und n_1, n_2, n_3 die zugehörigen Brechungscoefficienten, so ist die optische Länge Ψ nach dieser Definition

$$\Psi = n_1 r_1 + n_2 r_2 + n_3 r_3 \text{ etc. } + n_m r_m.$$

Nennen wir die Geschwindigkeit des Lichtes im leeren Raume c_0, in dem ersten, zweiten, dritten u. s. w. brechenden Mittel dagegen c_1, c_2, c_3, so ist (nach §. 9, Seite 36)

$$n_1 = \frac{c_0}{c_1}, \quad n_2 = \frac{c_0}{c_2}, \quad n_3 = \frac{c_0}{c_3} \ldots n_m = \frac{c_0}{c_m}$$

also

$$\Psi = c_0 \left[\frac{r_1}{c_1} + \frac{r_2}{c_2} + \frac{r_3}{c_3} + \text{etc.} + \frac{r_m}{c_m}\right].$$

Nenne ich nun t die Zeit, welche das Licht gebraucht, um vom Anfang bis zum Ende des hier betrachteten Weges zu gelangen, so ist

$$t = \frac{r_1}{c_1} + \frac{r_2}{c_2} + \frac{r_3}{c_3} + \text{etc.} + \frac{r_m}{c_m}$$

also

$$\Psi = c_0 t.$$

Die optische Länge ist also proportional der Zeit, in der das Licht die Länge des Strahls durchläuft, und ist gleich dem Wege, welchen das Licht in derselben Zeit im leeren Raume zurückgelegt haben würde.

Es kann der Begriff der optischen Länge auch angewendet werden auf den Fall, wo man den Strahl des letzten Mittels rückwärts verlängert denkt bis über die Grenze des Mittels hinaus, etwa bis zu einem Punkte hin, wo ein potentielles Bild des leuchtenden Punktes sich befindet. Um die optische Länge zwischen dem

[1] Siehe S. 142 u. 143. Die nun folgenden Theoreme können auch für das citirte Capitel von den monochromatischen Abweichungen des Auges verwendet werden.

leuchtenden Punkte und seinem potentiellen Bilde zu bestimmen, verfährt man dann wie vorher, nur rechnet man die Entfernung vom Eintritt des Strahls in das letzte Mittel bis zu dem potentiellen Bilde gemessen negativ. Die hier folgenden analytischen Sätze werden dadurch nicht geändert.

I. **Lehrsatz.** **Das Brechungsgesetz der Lichtstrahlen lässt sich durch die Bedingung ausdrücken, dass die optische Länge des Strahles zwischen einem ihm angehörigen Punkte im ersten und im zweiten Mittel ein Grenzwerth (Maximum oder Minimum) sein solle.**

Die beiden brechenden Mittel mögen durch eine beliebig gestaltete Fläche von continuirlicher Krümmung getrennt sein; das Coordinatensystem wollen wir so wählen, dass das Einfallsloth die Axe der z sei, die Gestalt der brechenden Fläche sei gegeben, indem z als Function von x und y bestimmt ist. Für den Einfallspunkt wird

$$x = y = z = 0, \quad \frac{dz}{dx} = 0, \quad \frac{dz}{dy} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Ferner seien a_1, b_1, c_1 die Coordinaten eines Punktes im einfallenden Strahle, a_2, b_2, c_2 die eines Punktes im gebrochenen Strahle. Verbinden wir diese Punkte mit einem Punkte der brechenden Fläche, dessen Coordinaten x, y, z sind, so ist die optische Länge dieses Weges

$$\Psi = n_1 \sqrt{(a_1-x)^2 + (b_1-y)^2 + (c_1-z)^2} + n_2 \sqrt{(a_2-x)^2 + (b_2-y)^2 + (c_2-z)^2}.$$

Damit Ψ, welches eine Function der unabhängigen Variablen x und y ist, ein Maximum oder Minimum werde, sind die ersten Bedingungen, welche hier schon genügend sind:

$$\frac{d\Psi}{dx} = 0, \qquad \frac{d\Psi}{dy} = 0,$$

oder

$$\left.\begin{aligned}
0 &= n_1 \frac{x - a_1 + (z - c_1)\dfrac{dz}{dx}}{\sqrt{(a_1 - x)^2 + (b_1 - y)^2 + (c_1 - z)^2}} + n_2 \frac{x - a_2 + (z - c_2)\dfrac{dz}{dx}}{\sqrt{(a_2 - x)^2 + (b_2 - y)^2 + (c_2 - z)^2}} \\
0 &= n_1 \frac{y - b_1 + (z - c_1)\dfrac{dz}{dy}}{\sqrt{(a_1 - x)^2 + (b_1 - y)^2 + (c_1 - z)^2}} + n_2 \frac{y - b_2 + (z - c_2)\dfrac{dz}{dy}}{\sqrt{(a_2 - x)^2 + (b_2 - y)^2 + (c_2 - z)^2}}
\end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad 2).$$

Für den Einfallspunkt des gebrochenen Strahls werden diese Gleichungen nach den in 1 gegebenen Bestimmungen

$$\left.\begin{aligned}
0 &= n_1 \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}} + n_2 \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \\
0 &= n_1 \frac{b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}} + n_2 \frac{b_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}
\end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad 2\text{a})$$

Wenn wir nun die Lage der Punkte a_1, b_1, c_1 und a_2, b_2, c_2 in der gewöhnlichen Weise durch Polarcoordinaten ausdrücken, d. h. setzen

$$\left.\begin{array}{ll} a_1 = r_1 \sin\alpha_1 \cos\vartheta_1 & a_2 = r_2 \sin\alpha_2 \cos\vartheta_2 \\ b_1 = r_1 \sin\alpha_1 \sin\vartheta_1 & b_2 = r_2 \sin\alpha_2 \sin\vartheta_2 \\ c_1 = r_1 \cos\alpha_1 & c_2 = r_2 \cos\alpha_2 \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots 3),$$

so verwandeln sich die Gleichungen 2 a) in folgende:

$$\left.\begin{array}{l} n_1 \sin\alpha_1 \cos\vartheta_1 = - n_2 \sin\alpha_2 \cos\vartheta_2 \\ n_1 \sin\alpha_1 \sin\vartheta_1 = - n_2 \sin\alpha_2 \sin\vartheta_2 \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots 2\text{b}).$$

Beide in das Quadrat erhoben und addirt, geben

$$n_1^2 \sin^2\alpha_1 = n_2^2 \sin^2\alpha_2,$$

d. h.

$$n_1 \sin\alpha_1 = \pm n_2 \sin\alpha_2.$$

Es passt hier nur das positive Zeichen, weil α_1 zwischen 0^0 und 90^0, α_2 aber nach der hier gewählten Bezeichnung zwischen 90^0 und 180^0 liegen muss, also $\sin\alpha_1$, $\sin\alpha_2$, sowie auch n_1 und n_2 immer positiv sind. Es ist also

$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\alpha_2 \quad \ldots\ldots\ldots 4)$$

und wenn man dies in die Gleichungen 2 b) einsetzt, erhält man

$$\begin{array}{l} \cos\vartheta_1 = - \cos\vartheta_2 \\ \sin\vartheta_1 = - \sin\vartheta_2 \end{array}$$

d. h.

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 + 180^0 \quad \ldots\ldots\ldots 4\text{a}).$$

Die Gleichungen 4) und 4 a), welche wir aus der Bedingung hergeleitet haben, dass die optische Länge des Strahls ein Grenzwerth sei, sind aber identisch mit den beiden Bedingungen des Brechungsgesetzes. Es ist nämlich, wie aus den Gleichungen 3) hervorgeht, α_1 der Brechungswinkel, ϑ_1 der Winkel, den die xz Ebene mit der Einfallsebene, ϑ_2 der, den die xz Ebene mit der Brechungsebene macht. Einfalls- und Brechungsebene machen also mit einander einen Winkel von 180^0, d. h. fallen in eine Ebene zusammen. Genau dieselbe Beweisführung passt auf das Problem der Spiegelung des Strahls an der bisher als brechend vorausgesetzten Fläche. Man hat nur $n_1 = n_2$ zu setzen, weil der Strahl in demselben Mittel bleibt, und α_2 ist wie α_1 zwischen 0 und 90^0 zu nehmen. Dann werden die Gleichungen 4) und 4 a)

$$\begin{array}{l} \sin\alpha_1 = \sin\alpha_2 \text{ oder } \alpha_1 = \alpha_2 \\ \vartheta_2 = \vartheta_1 + 180, \end{array}$$

welches die beiden Gesetze der Spiegelung eines Strahls sind.

Nachdem der aufgestellte Lehrsatz für eine brechende Fläche erwiesen ist, lässt er sich leicht auf beliebig viele ausdehnen. **Wenn ein Lichtstrahl durch eine beliebige Anzahl von brechenden Mitteln hindurchgegangen ist, welche durch Flächen von continuirlicher Krümmung begrenzt sind, so lässt sich sein Weg durch die Bedingung bestimmen, dass die optische Länge des Strahls zwischen einem seiner Punkte im ersten und einem im letzten Mittel ein Grenzwerth (Maximum oder Minimum) ist.**

Es sei Ψ die optische Länge des Strahls, und es seien die Punkte der ersten brechenden Fläche durch die Coordinaten x_1 und y_1, die der zweiten durch x_2 und y_2, die der $m$ten durch x_m und y_m gegeben, und alle diese Coordinatensysteme mögen so gelegt sein, dass ihre z Axe mit dem Einfallsloth zusammenfällt, die

xy Ebene die brechende Fläche tangirt. Es sind die ersten Bedingungen des Grenzwerthes

$$\frac{d\Psi}{dx_1} = 0, \qquad \frac{d\Psi}{dy_1} = 0,$$

$$\frac{d\Psi}{dx_2} = 0, \qquad \frac{d\Psi}{dy_2} = 0$$

u. s. w.

$$\frac{d\Psi}{dx_m} = 0, \qquad \frac{d\Psi}{dy_m} = 0.$$

Die erste dieser Gleichungen ist nach dem eben bewiesenen Lehrsatze identisch mit der Bedingung, dass der Strahl an der ersten Fläche nach dem bekannten Brechungsgesetze gebrochen werde; die zweite sagt dasselbe für die zweite Fläche, die $m$te für die $m$te. Also ist der Weg des Strahls durch die aufgestellte Bedingung genau ebenso bestimmt, wie durch das Brechungsgesetz.

Auch in diesem Falle genügt die Untersuchung der ersten Differentialquotienten der optischen Länge. Ob der Weg des Strahles für alle Verschiebungen der Einfallspunkte ein Maximum, oder für alle ein Minimum, oder für einige ein Maximum, für andere ein Minimum u. s. w. ist, hängt bekanntlich von den zweiten Differentialquotienten ab, kommt aber hier zunächst nicht in Betracht, und es mag deshalb in der vorliegenden Untersuchung erlaubt sein, Grenzwerthe im Allgemeinen alle die Werthe der optischen Länge des Strahls zu nennen, deren erste Differentialquotienten den für das Maximum und Minimum aufzustellenden Bedingungen entsprechen, ohne dass weiter nach dem Vorzeichen und der Grösse der zweiten Differentialquotienten gefragt wird. Welchen Einfluss bei unserer Untersuchung die zweiten Differentialquotienten haben, wird sich später zeigen.

II. Wenn Lichtstrahlen von einem Punkte ausgegangen und durch beliebig viele Flächen von continuirlicher Krümmung gebrochen worden sind, stehen sie nach der letzten Brechung senkrecht auf jeder krummen Fläche, für deren sämmtliche Punkte die optische Länge des Strahls einen constanten Werth hat.

Die Bezeichnung bleibe dieselbe, wie bei der Verallgemeinerung des Satzes I. Der Endpunkt des Strahles liege in einer krummen Fläche, für welche

$$\Psi = \text{Const.} \qquad \qquad 1).$$

Wir wollen die einzelnen Punkte dieser Fläche durch dasselbe Coordinatensystem bestimmen, durch welches die Punkte der letzten brechenden Fläche bestimmt sind, und für die Punkte der Fläche $\Psi = C$ setzen $x_m = a$, $y_m = b$, $z_m = c$, und c als Function von a und b ansehen.

Wir wollen nun zwei gebrochene Strahlen betrachten, welche unendlich wenig von einander entfernt sind. Es seien die Coordinaten der Punkte, wo der erste die betreffenden Flächen trifft

$$x_1,\ y_1,\ x_2,\ y_2 \text{ etc. } x_m,\ y_m,\ a,\ b,\ c,$$

die des zweiten

$$x_1 + \Delta x_1,\ \ y_1 + \Delta y_1,\ \ x_2 + \Delta x_2,\ \ y_2 + \Delta y_2 \ \text{ etc.}$$

$$x_m + \Delta x_m,\ y_m + \Delta y_m,\ \ a + \Delta a,\ \ b + \Delta b,\ \ c + \Delta c,$$

wobei wir zu setzen haben, weil c eine Function von a und b ist,

$$\Delta c = \frac{dc}{da}\,\Delta a + \frac{dc}{db}\,\Delta b.$$

Die optische Länge des ersten Strahls sei Ψ, die des zweiten $\Psi + \Delta\Psi$, so ist für unendlich kleine Werthe der Aenderungen

$$\Psi + \Delta\Psi = \Psi + \frac{d\Psi}{dx_1}\Delta x_1 + \frac{d\Psi}{dx_2}\Delta x_2 \text{ etc.} + \frac{d\Psi}{dx_m}\Delta x_m + \left(\frac{d\Psi}{da} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{da}\right)\Delta a$$
$$+ \frac{d\Psi}{dy_1}\Delta y_1 + \frac{d\Psi}{dy_2}\Delta y_2 \text{ etc.} + \frac{d\Psi}{dy_m}\Delta y_m + \left(\frac{d\Psi}{db} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{db}\right)\Delta b.$$

Da nun der Werth von Ψ in der Fläche, deren Punkte durch die Coordinaten a, b und c gegeben sind, constant sein soll, so folgt, dass

$$\Delta\Psi = 0$$

und da ferner nach dem vorigen Lehrsatze

$$0 = \frac{d\Psi}{dx_1} = \frac{d\Psi}{dy_1} = \frac{d\Psi}{dx_2} = \frac{d\Psi}{dy_2} \text{ etc.},$$

so folgt

$$\left(\frac{d\Psi}{da} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{da}\right)\Delta a + \left(\frac{d\Psi}{db} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{db}\right)\Delta b = 0,$$

welche Gleichung für alle beliebigen Werthe von $\frac{\Delta a}{\Delta b}$ gültig sein muss, woraus folgt, dass einzeln:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\Psi}{da} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{da} &= 0 \\ \frac{d\Psi}{db} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{db} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2).$$

Nennen wir nun r_0, r_1 etc. r_m die Weglängen des Strahls in den verschiedenen brechenden Medien, n_0, n_1 etc. n_m die Brechungsverhältnisse, so ist

$$\Psi = n_0 r_0 + n_1 r_1 + \text{etc.} + n_m r_m.$$

Hierin ist nur r_m abhängig von a, b und c, folglich

$$\frac{d\Psi}{da} = n_m \frac{dr_m}{da} = n_m \frac{a - x_m}{r_m}$$
$$\frac{d\Psi}{db} = n_m \frac{dr_m}{db} = n_m \frac{b - y_m}{r_m}$$
$$\frac{d\Psi}{dc} = n_m \frac{dr_m}{dc} = n_m \frac{c - z_m}{r_m},$$

so verwandeln sich endlich die Gleichungen 2) in

$$\left.\begin{aligned} (a - x_m) + (c - z_m)\frac{dc}{da} &= 0 \\ (b - y_m) + (c - z_m)\frac{dc}{db} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2\,a),$$

welche bedeuten, dass a, b, c der Fusspunkt einer vom Punkt x_m, y_m, z_m auf die Fläche $\Psi = C$ gefällten Normale ist.

Dass dies so sei, ergiebt sich am einfachsten, wenn man bedenkt, dass die Normale selbst ein Maximum oder Minimum der Entfernung zwischen dem Punkte, von dem man sie fällt, und der krummen Fläche ist. Es ist aber die Entfernung r_m zwischen dem Punkte x_m, y_m, z_m und dem Punkte a, b, c der Fläche

$$r_m = \sqrt{(x_m - a)^2 + (y_m - b)^2 + (z_m - c)^2};$$

um sie zu einem Maximum oder Minimum zu machen, muss man setzen

$$0 = \frac{dr_m}{da} + \frac{dr_m}{dc}\frac{dc}{da} = \frac{a - x_m}{r_m} + \frac{dc}{da} \cdot \frac{c - z_m}{r_m}$$

$$0 = \frac{dr_m}{db} + \frac{dr_m}{dc}\frac{dc}{da} = \frac{b - y_m}{r_m} + \frac{dc}{db} \cdot \frac{c - z_m}{r_m},$$

welche mit den Gleichungen 2a) identisch sind.

Der durch den Punkt a, b, c gehende Strahl ist also eine Normale auf der durch denselben Punkt gehenden Fläche $\Psi = C$.

Da das Licht gleiche optische Längen in gleicher Zeit zurücklegt, so gelangt es auch in gleicher Zeit von dem leuchtenden Punkte zu allen Punkten der Fläche $\Psi = C$, und diese ist daher eine Wellenfläche, d. h. sie geht durch alle diejenigen Punkte, in denen die gleiche Phase der Aetherschwingung stattfindet.

Bestimmung des Verlaufs eines unendlich dünnen Strahlenbündels. Nachdem bewiesen worden ist, dass es eine krumme Fläche giebt, die Wellenfläche, auf welcher alle durch Brechung in beliebigen Flächen von continuirlicher Krümmung aus homocentrischem Licht entstandenen Strahlen senkrecht stehen, folgt auch, dass für die gebrochenen Lichtstrahlen die Sätze gelten, welche für die Normalen krummer Flächen bekannt sind. Denken wir uns also durch einen beliebig gewählten Strahl A eine Ebene gelegt, welche die Wellenfläche in einer Curve schneidet, und die Ebene um den Strahl gedreht, so wird die Schnittlinie im Allgemeinen, da wo sie den Strahl A schneidet, verschiedene Krümmung zeigen, und zwar wird die Ebene der grössten Krümmung der Schnittlinie senkrecht stehen auf der Ebene ihrer kleinsten Krümmung. Errichtet man nun in den Punkten der Wellenfläche, welche dem Strahle A unendlich nahe sind, Normalen, welche also benachbarten Strahlen entsprechen, so schneiden diejenigen, deren Fusspunkte in der Linie grösster oder kleinster Krümmung liegen, den Strahl A in dem Mittelpunkte bezüglich des grössten oder kleinsten Krümmungskreises, die dagegen, deren Fusspunkte weder in der Linie grösster noch kleinster Krümmung liegen, schneiden den Strahl A gar nicht. Auf jedem Strahle giebt es also im Allgemeinen zwei Brennpunkte, in denen er von benachbarten Strahlen geschnitten wird, welche den Mittelpunkten der grössten und kleinsten Krümmung der Wellenfläche im Fusspunkte des Strahls entsprechen. Nur wenn beide Punkte in einen zusammenrücken, d. h. die Krümmung der Wellenfläche im Fusspunkte des Strahls nach allen Richtungen hin gleich gross wird, wird der Strahl A von allen ihm unendlich nahen Strahlen in einem Punkte geschnitten.

Um diese Sätze analytisch darzustellen, wollen wir ein Coordinatensystem benutzen, dessen zAxe mit dem Strahle A zusammenfällt. Für die einzelnen Punkte der Wellenfläche setzen wir

$$x = a, \quad y = b, \quad z = c.$$

Die Fläche sei gegeben dadurch, dass c als Function von a und b gegeben ist. Nach der Annahme über die Lage des Coordinatensystems ist für

$$a = b = 0 \quad \text{auch} \quad \frac{dc}{da} = \frac{dc}{db} = 0 \quad \ldots\ldots \quad 1).$$

Wenn x, y, z die Coordinaten eines Punktes der in a, b, c auf der Wellenfläche errichteten Normale bezeichnen, haben wir, wie in Lehrsatz II Gleichung 2a:

$$\left.\begin{aligned}(a-x)+(c-z)\frac{dc}{da} &= 0\\ (b-y)+(c-z)\frac{dc}{db} &= 0\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 1\,a).$$

Setzt man für a und b die unendlich wenig davon verschiedenen Grössen $a + \Delta a$, $b + \Delta b$, so werden die Gleichungen 1 a)

$$(a+\Delta a - x) + \left(c + \frac{dc}{da}\Delta a + \frac{dc}{db}\Delta b - z\right)\frac{dc}{da}$$
$$+ (c-z)\left(\frac{d^2c}{da^2}\Delta a + \frac{d^2c}{da\,db}\Delta b\right) = 0$$
$$(b+\Delta b - y) + \left(c + \frac{dc}{da}\Delta a + \frac{dc}{db}\Delta b - z\right)\frac{dc}{db}$$
$$+ (c-z)\left(\frac{d^2c}{da\cdot db}\Delta a + \frac{d^2c}{db^2}\Delta b\right) = 0.$$

Setzen wir hierin $a = b = 0$ und nach 1) auch $\frac{dc}{da} = \frac{dc}{db} = 0$, so erhalten wir die Gleichungen einer Normale, die dem Strahl A unendlich nahe die Wellenfläche in dem durch die Coordinaten Δa und Δb gegebenen Punkte schneidet, nämlich

$$\left.\begin{aligned}\Delta a - x + (c-z)\left(\frac{d^2c}{da^2}\Delta a + \frac{d^2c}{da\cdot db}\Delta b\right) &= 0\\ \Delta b - y + (c-z)\left(\frac{d^2c}{da\cdot db}\Delta a + \frac{d^2c}{db^2}\Delta b\right) &= 0\end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 2).$$

Für alle Punkte des Strahles A ist gleichzeitig $x = y = 0$. Soll A also von dem Strahle geschnitten werden, dessen Weg durch die Gleichungen 2) gegeben ist, so muss auch in diesen für irgend einen Werth von z gleichzeitig $x = y = 0$ werden. Setzen wir nun in ihnen $x = y = 0$ und eliminiren z, so bleibt als Bedingung für die Möglichkeit des Schneidens:

$$\frac{d^2c}{da\cdot db}\Delta a^2 + \left(\frac{d^2c}{db^2} - \frac{d^2c}{da^2}\right)\Delta a\,\Delta b - \frac{d^2c}{da\cdot db}\Delta b^2 = 0 \quad \ldots \quad 3).$$

Nennen wir die unendlich kleine Entfernung der Fusspunkte der beiden Normalen r und den Winkel, den sie mit der x Axe macht, α, welches also zwischen 0 und π liegen muss, so ist

$$\Delta a = r\cos\alpha, \qquad \Delta b = r\sin\alpha.$$

Setzen wir ausserdem

$$2n = \frac{\dfrac{d^2c}{db^2} - \dfrac{d^2c}{da^2}}{\dfrac{d^2c}{da\cdot db}}$$

so wird die Gleichung 3) vorausgesetzt, dass $\frac{d^2 c}{da \cdot db}$ nicht gleich Null ist,

$$\operatorname{tang}^2 \alpha - 2n \operatorname{tang} \alpha = 1 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3\text{a}),$$

also

$$\operatorname{tang} \alpha = n \pm \sqrt{1 + n^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3\text{b}).$$

Die beiden Werthe von tang α, welche jedenfalls reell sind, kann man auch schreiben

$$n + \sqrt{1 + n^2} \quad \text{und} \quad - \frac{1}{n + \sqrt{1 + n^2}} .$$

Wenn also α_0 der eine entsprechende Werth von α ist, ist $\alpha + \frac{\pi}{2}$ oder $\alpha - \frac{\pi}{2}$ der andere. Die beiden Winkel sind um einen Rechten unterschieden. Die Grösse r, die den Abstand der Normalen in der Wellenfläche bezeichnet, verschwindet aus der Gleichung 3a). Es wird also der Strahl A geschnitten von allen unendlich nahen Strahlen, welche in Ebenen liegen, die mit der x Axe die Winkel α_0 und $\alpha_0 + \frac{\pi}{2}$ bilden.

Bisher war die Lage der x und y Axe willkührlich in der auf den Strahl A senkrechten Ebene. Zur Vereinfachung wollen wir sie jetzt so gelegt denken, dass sie mit den Ebenen der schneidenden Strahlen zusammenfallen, was jedenfalls ausführbar sein muss. Es müssen dann die beiden Werthe von tang α werden 0 und ∞, dies bedingt, dass

$$n = \pm \infty$$

und

$$\frac{d^2 c}{da \cdot db} = 0.$$

In der That, wenn wir die letztere Bedingung erfüllt denken, reducirt sich die Bedingung des Schneidens, Gleichung 3) auf

$$\left(\frac{d^2 c}{db^2} - \frac{d^2 c}{da^2}\right) \varDelta a \varDelta b = 0,$$

welche erfüllt wird durch die Annahme, dass entweder $\varDelta a = 0$ oder $\varDelta b = 0$, dass also die schneidenden Normalen entweder in der yz Ebene oder in der xz Ebene liegen. Ist endlich gleichzeitig auch noch

$$\frac{d^2 c}{db^2} - \frac{d^2 c}{da^2} = 0,$$

so ist die Bedingung des Schneidens für alle beliebigen unendlich kleinen Werthe von $\varDelta a$ und $\varDelta b$ erfüllt, es schneiden also alle unendlich nahen Normalen den Strahl A. Indem wir weiter die Annahme $\frac{d^2 c}{da\, db} = 0$ festhalten, und dann entweder $\varDelta a = 0$ oder $\varDelta b = 0$ setzen, finden wir, wie oben bemerkt wurde, die Entfernung z, in der die benachbarten Strahlen den der z Axe parallelen Strahl schneiden, indem wir in den Gleichungen 2) $x = y = 0$ setzen.

Für die Strahlen in der xz Ebene ist $\varDelta b = 0$, und es folgt aus der ersten der Gleichungen 2) für $z - c$, die Entfernung des Schneidepunkts von der Wellenfläche:

$$z - c = \frac{1}{\frac{d^2 c}{d a^2}}.$$

Die zweite Gleichung wird $0 = 0$. Für die Strahlen in der yz Ebene ist $\varDelta a = 0$ und

$$z - c = \frac{1}{\frac{d^2 c}{d b^2}}.$$

Wenn endlich $\frac{d^2 c}{d a^2} = \frac{d^2 c}{d b^2} = \frac{1}{\varrho}$, so ist für alle benachbarte Strahlen ohne Unterschied

$$z - c = \varrho.$$

Uebrigens sind in diesem Falle die xz und yz Ebene auch die Ebenen grösster und kleinster Krümmung, und die Werthe der entsprechenden Krümmungsradien ϱ_a und ϱ_b sind

$$\varrho_a = \frac{1}{\frac{d^2 c}{d a^2}}, \qquad \varrho_b = \frac{1}{\frac{d^2 c}{d b^2}},$$

so dass also die Brennpunkte auch mit den Krümmungsmittelpunkten der Wellenfläche zusammenfallen.

Form eines unendlich dünnen kreisförmigen Strahlenbündels. Um eine deutlichere Vorstellung von dem Verlauf der Strahlen in einem unendlich dünnen Bündel zu erhalten, wollen wir die Form eines Strahlenbündels betrachten, dessen Basis in der Wellenfläche eine Kreislinie ist. Wir setzen also in den Gleichungen 2) wie vorher

$$\frac{d^2 c}{d a \cdot d b} = 0 \text{ und } \varDelta a = r \cos \alpha, \; \varDelta b = r \sin \alpha$$

und erhalten aus den Gleichungen 2)

$$r \cos \alpha - x + (c - z) \frac{d^2 c}{d a^2} r \cos \alpha = 0$$

$$r \sin \alpha - y + (c - z) \frac{d^2 c}{d b^2} r \sin \alpha = 0.$$

Um die Schnittlinie der Oberfläche des Bündels mit einer auf der Axe des Bündels senkrechten Ebene zu erhalten, müssen wir z constant setzen und den Winkel α eliminiren. Setzen wir zur Abkürzung

$$p = + r \left[1 + (c - z) \frac{d^2 c}{d a^2}\right] = + \frac{r}{\varrho_a} [\varrho_a + c - z]$$

$$q = + r \left[1 + (c - z) \frac{d^2 c}{d b^2}\right] = + \frac{r}{\varrho_b} [\varrho_b + c - z],$$

so erhalten wir

$$\frac{x^2}{p^2} + \frac{y^2}{q^2} = 1.$$

Dies ist die Gleichung einer Ellipse, deren Axen von der Länge $2p$ und $2q$ den Axen der x und y parallel liegen. Beide Axen der Ellipse sind kleiner, wenn r kleiner ist; füllt das Strahlenbündel also in der ersten Wellenfläche nicht blos eine

Kreislinie, sondern eine Kreisfläche an, so bleiben sämmtliche Strahlen doch innerhalb des Raums, den die äusseren Strahlen begrenzen, eingeschlossen, und die letzteren bestimmen mithin die Gestalt des Bündels. In der Wellenfläche, von der wir ausgingen, selbst ist $c - z = 0$, also die Axen $p = q = r$, der Querschnitt ein Kreis. Die Axe p wird gleich Null, wenn

$$z - c = \frac{1}{\frac{d^2 c}{da^2}} = \varrho_a,$$

wenn also der Querschnitt des Bündels durch die Brennpunkte der Strahlen in der xz Ebene gelegt wird. Ebenda ist die andere Halbaxe

$$q = \pm \frac{r}{\varrho_b} (\varrho_a + \varrho_b).$$

Der Querschnitt des Bündels ist alsdann eine der y Axe parallele gerade Linie, deren Länge gleich dem eben angegebenen Werthe von q ist.

Dagegen wird der Querschnitt des Bündels eine der x Axe parallele gerade Linie, wenn

$$z - c = \frac{1}{\frac{d^2 c}{db^2}} = \varrho_b$$

$$q = 0, \qquad p = \pm \frac{r}{\varrho_a} (\varrho_a + \varrho_b).$$

Endlich giebt es noch eine zweite Stelle, wo der Querschnitt des Strahlenbündels ein Kreis ist, wo nämlich

$$p = -q$$

$$1 + \frac{c - z}{\varrho_a} = -1 - \frac{c - z}{\varrho_b}$$

$$z - c = \frac{2 \varrho_a \varrho_b}{\varrho_a + \varrho_b}$$

daselbst wird

$$p = q = \pm r \cdot \frac{\varrho_a - \varrho_b}{\varrho_a + \varrho_b}.$$

Zwischen den beiden kreisförmigen Querschnitten des Bündels muss einer der linienförmigen Querschnitte liegen. Dieser Linie sind die grösseren Axen der elliptischen Querschnitte parallel, welche zwischen den beiden kreisförmigen angelegt werden, während die grossen Axen der ausserhalb dieses Zwischenraums liegenden senkrecht dagegen gestellt sind. In *Fig. 108* bezeichnet die Linie cd den mittleren Strahl, in c ist ein kreisförmiges Diaphragma angenommen, in a und b die Brennpunkte.

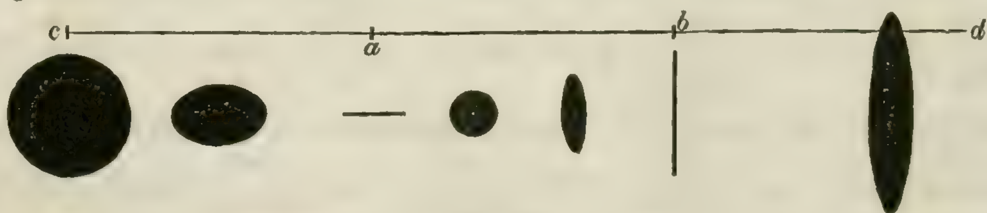


Fig. 108.

Unter der Linie sind die Querschnitte des Bündels, welche den darüber liegenden Punkten der Linie entsprechen, abgebildet.

Allgemeine analytische Bedingung für die Lage der Brennpunkte.

Wir wollen die optische Länge zweier unendlich naher Strahlen A und B von ihrem gemeinsamen Ausgangspunkte an bis zu einem Brennpunkte hin, wo sie nach beliebig vielen Brechungen an beliebigen brechenden Flächen von continuirlicher Krümmung wieder zusammentreffen, Ψ und $\Psi + \Delta\Psi$ nennen. Die Coordinatensysteme, nach denen wir die Punkte in den einzelnen brechenden Flächen bestimmen, werden wieder so gedacht, dass ihre zAxe mit den dem Strahle A angehörigen Einfallslothen zusammenfällt, und ihre xyEbene die brechende Fläche tangirt. Die Coordinaten der Einfallspunkte des Strahles B seien in der ersten Fläche x_1, y_1, z_1, in der zweiten x_2, y_2, z_2 u. s. w., in der $m$ten x_m, y_m, z_m. Es wird indessen im Folgenden vorausgesetzt, dass die optischen Längen ausgedrückt sind als Function der x und y allein, und die z, welche selbst wieder Functionen von x und y sind, aus diesen Werthen eliminirt sind; da übrigens die Strahlen A und B unendlich nahe sein sollen, werden die Grössen x_1, y_1 bis x_m, y_m als unendlich klein betrachtet.

Nach dem Taylor'schen Satze ist alsdann

$$\Psi + \Delta\Psi = \Psi + \frac{d\Psi}{dx_1}x_1 + \frac{d\Psi}{dx_2}x_2 + \text{etc.} + \frac{d\Psi}{dx_m}x_m$$
$$+ \frac{d\Psi}{dy_1}y_1 + \frac{d\Psi}{dy_2}y_2 + \text{etc.} + \frac{d\Psi}{dy_m}y_m.$$

Es müssen nun beide Strahlen den im ersten Lehrsatze ausgesprochenen Bedingungen genügen, d. h. die ersten Differentialquotienten von Ψ und von $\Psi + \Delta\Psi$ nach x_1, y_1, x_2, y_2 etc. x_m, y_m genommen müssen gleich 0 sein. Dies giebt für den ersten Strahl

$$\frac{d\Psi}{dx_1} = 0, \quad \frac{d\Psi}{dx_2} = 0 \text{ etc. } \frac{d\Psi}{dx_m} = 0,$$
$$\frac{d\Psi}{dy_1} = 0, \quad \frac{d\Psi}{dy_2} = 0 \text{ etc. } \frac{d\Psi}{dy_m} = 0$$

und mit Berücksichtigung dieser Gleichungen für den zweiten Strahl folgendes System von Gleichungen

$$\left.\begin{array}{l}
\frac{d^2\Psi}{dx_1^2}x_1 + \frac{d^2\Psi}{dx_1\,dy_1}y_1 + \text{etc.} + \frac{d^2\Psi}{dx_1\,dx_m}x_m + \frac{d^2\Psi}{dx_1\,dy_m}y_m = 0 \\
\frac{d^2\Psi}{dy_1\,dx_1}x_1 + \frac{d^2\Psi}{dy_1^2}y_1 + \text{etc.} + \frac{d^2\Psi}{dy_1\,dx_m}x_m + \frac{d^2\Psi}{dy_1\,dy_m}y_m = 0 \\
\qquad\qquad\qquad \text{etc.} \\
\frac{d^2\Psi}{dx_m\,dx_1}x_1 + \frac{d^2\Psi}{dx_m\,dy_1}y_1 + \text{etc.} + \frac{d^2\Psi}{dx_m^2}x_m + \frac{d^2\Psi}{dx_m\,dy_m}y_m = 0 \\
\frac{d^2\Psi}{dy_m\,dx_1}x_1 + \frac{d^2\Psi}{dy_m\,dy_1}y_1 + \text{etc.} + \frac{d^2\Psi}{dy_m\,dx_m}x_m + \frac{d^2\Psi}{dy_m^2}y_m = 0
\end{array}\right\} \ldots 4).$$

Die Anzahl der Glieder in diesen Gleichungen vermindert sich übrigens dadurch beträchtlich, dass $\frac{d^2\Psi}{dx_f\,dx_g}$ und $\frac{d^2\Psi}{dx_f\,dy_g}$ und $\frac{d^2\Psi}{dy_f\,dy_g}$ gleich Null werden, so oft die Indices f und g um mehr als Eins verschieden sind.

Die Zahl unserer Gleichungen ist $2m$ und sie enthalten $2m$ Unbekannte x_1, y_1 bis x_m, y_m. Da indessen nicht alle diese Unbekannten gleich Null werden dürfen

(der Strahl B soll ja von A unterschieden sein), so kann man alle Gleichungen durch eine der Unbekannten x_l, welche nicht Null wird, dividiren, und die $(2m-1)$ anderen Unbekannten dividirt durch x_l als neue Unbekannte betrachten. Dann hat man $2m$ Gleichungen mit $2m-1$ Unbekannten, so dass, wenn man die letzteren eliminirt, noch eine Gleichung übrig bleibt, in welcher die Grössen x_1, y_1 bis x_m, y_m nicht mehr vorkommen, sondern nur noch die partiellen zweiten Differentialquotienten von Ψ. Diese letzte Eliminationsgleichung, in welcher die Determinante der Gleichungen 4) gleich Null gesetzt wird, ist die gesuchte Gleichung für die Lage der Brennpunkte.

Die Determinante der Gleichungen 4) ist nach bekannten Regeln [1] leicht zu bilden. Sie ist eine Summe von Gliedern, deren erstes das Product:

$$\frac{d^2\Psi}{dx_1 \cdot dx_1} \cdot \frac{d^2\Psi}{dy_1\, dy_1} \cdot \frac{d^2\Psi}{dx_2 \cdot dx_2} \text{ etc. } \frac{d^2\Psi}{dx_m \cdot dx_m} \cdot \frac{d^2\Psi}{dy_m \cdot dy_m}.$$

Die übrigen Glieder der Summe erhält man, indem man in den Nennern der Differentialquotienten, welche Producte je zweier Factoren sind, alle ersten Factoren unverändert lässt, mit den zweiten aber alle möglichen Variationen bildet, und so oft man dabei zwei dieser Factoren mit einander vertauscht, auch das Vorzeichen des Gliedes wechseln lässt.

Nach der Bezeichnungsweise der Variationsrechnung ausgedrückt, wird also die Lage eines Strahls gefunden zwischen seinem Anfangs- und Endpunkt durch die Bedingung, dass die erste Variation seiner optischen Länge gleich Null sei. Und sein Anfangs- und Endpunkt sind zusammengehörige Brennpunkte, wenn die zweite Variation der optischen Länge auch gleich Null gemacht werden kann. Im letzteren Falle ist diese Länge nicht nothwendig ein Maximum oder Minimum.

Brechung im Prisma.

Wir denken die Lage des leuchtenden Punktes durch drei rechtwinkelige Coordinaten a, b, c gegeben, so dass die Axe der c mit der brechenden Kante, die Ebene der bc mit der ersten brechenden Fläche zusammenfällt, und die positiven a ausserhalb des Prisma liegen. Für den Einfallspunkt des Strahles auf dieser Fläche sei $a = 0$, $b = y$, $c = z$. Ebenso denken wir einen Punkt des aus dem Prisma getretenen Strahls durch drei rechtwinkelige Coordinaten α, β, γ gegeben, die einem zweiten Systeme angehören, dessen γAxe wieder mit der brechenden Kante, dessen $\beta\gamma$ Ebene aber mit der zweiten brechenden Fläche zusammenfällt, und dessen positive α ebenfalls ausserhalb des Prisma liegen. Die γ sollen von demselben Punkte der Kante ab gemessen werden wie die c, so dass also die ab Fläche des ersten Systems mit der $\alpha\beta$ Fläche des zweiten identisch ist. Für den Austrittspunkt des Strahles aus dem Prisma sei $\alpha = 0$, $\beta = v$, $\gamma = \zeta$. Der brechende Winkel des Prisma sei φ, das Brechungsverhältniss der Substanz des Prisma gegen das äussere Medium sei n. Die Länge des Strahls vor dem Prisma sei r_0, die im Prisma r_1, hinter dem Prisma r_2, die optische Länge des ganzen Strahls Ψ, so ist

$$\left.\begin{aligned} r_0 &= \sqrt{a^2 + (b-y)^2 + (c-z)^2} \\ r_1 &= \sqrt{y^2 - 2yv\cos\varphi + v^2 + (z-\zeta)^2} \\ r_2 &= \sqrt{\alpha^2 + (\beta - v)^2 + (\gamma - \zeta)^2} \\ \Psi &= r_0 + nr_1 + r_2 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \; 5).$$

[1] S. Jacobi in Crelle's Journ. für Math. XXII.

Wenn wir die Coordinaten des ersten Systems in denen des zweiten ausdrücken, so ist

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= -a\cos\varphi - b\sin\varphi \\ \beta &= -a\sin\varphi + b\cos\varphi \\ \gamma &= c \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ 5\text{a}).$$

Nach Lehrsatz I. sind für den Strahl, wenn er nach dem Brechungsgesetze gebrochen sein soll, folgende Bedingungen zu erfüllen:

$$\left.\begin{aligned} 0 &= \frac{d\Psi}{dy} = \frac{y-b}{r_0} + n\frac{y-v\cos\varphi}{r_1} \\ 0 &= \frac{d\Psi}{dv} = \frac{v-\beta}{r_2} + n\frac{v-y\cos\varphi}{r_1} \\ 0 &= \frac{d\Psi}{dz} = \frac{z-c}{r_0} + n\frac{z-\zeta}{r_1} \\ 0 &= \frac{d\Psi}{d\zeta} = \frac{\zeta-\gamma}{r_2} + n\frac{\zeta-z}{r_1} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ 6).$$

Wenden wir folgende Bezeichnung an

$$\left.\begin{aligned} \frac{b-y}{nr_0} &= \frac{y-v\cos\varphi}{r_1} = \cos m \\ \frac{\beta-v}{nr_2} &= \frac{v-y\cos\varphi}{r_1} = \cos\mu \\ \frac{c-z}{nr_0} &= \frac{\zeta-\gamma}{nr_2} = \frac{z-\zeta}{r_1} = \cos\nu \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ 6\text{a}),$$

wobei sich ergiebt

$$\sin^2\varphi\,\sin^2\nu = \cos^2 m + 2\cos m\,\cos\mu\,\cos\varphi + \cos^2\mu \quad \ldots\ 6\text{b}),$$

und bilden wir mit Benutzung dieser Bezeichnung die zweiten Differentialquotienten von Ψ, so wird das System der Gleichungen 4), welche die Lage der Brennpunkte und die Verhältnisse der unendlich kleinen Differenzen Δy, Δz, Δv, $\Delta\zeta$ beziehlich der Coordinaten y, z, v und ζ je zweier benachbarter und sich in conjugirten Brennpunkten schneidender Strahlen ergeben, folgendes:

$$\left.\begin{aligned} &\left[\frac{1}{r_0}(1-n^2\cos^2 m) + \frac{n}{r_1}\sin^2 m\right]\Delta y - \left(\frac{n^2}{r_0}+\frac{n}{r_1}\right)\cos m\cos\nu\,\Delta z \\ &\qquad - \frac{n}{r_1}(\cos\varphi + \cos m\cos\mu)\,\Delta v + \frac{n}{r_1}\cos m\cos\nu\,\Delta\zeta = 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ 7\text{a})$$

$$\left.\begin{aligned} &-\left(\frac{n^2}{r_0}+\frac{n}{r_1}\right)\cos m\cos\nu\,\Delta y + \left[\frac{1}{r_0}(1-n^2\cos^2\nu) + \frac{n}{r_1}\sin^2\nu\right]\Delta z \\ &\qquad - \frac{n}{r_1}\cos\mu\cos\nu\,\Delta v - \frac{n}{r_1}\sin^2\nu\,\Delta\zeta = 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ 7\text{b})$$

$$\left.\begin{array}{l} -\frac{n}{r_1}(\cos\varphi+\cos m\cos\mu)\,\Delta y-\frac{n}{r_1}\cos\mu\cos\nu\,\Delta z \\ \quad+\left[\frac{1}{r_2}(1-n^2\cos^2\mu)+\frac{n}{r_1}\sin^2\mu\right]\Delta v+\left(\frac{n^2}{r_2}+\frac{n}{r_1}\right)\cos\mu\cos\nu\,\Delta\zeta=0 \end{array}\right\}\text{7c)}$$

$$\left.\begin{array}{l} \frac{n}{r_1}\cos m\cos\nu\,\Delta y-\frac{n}{r_1}\sin^2\nu\,\Delta z \\ \quad+\left(\frac{n^2}{r_2}+\frac{n}{r_1}\right)\cos\mu\cos\nu\,\Delta v+\left[\frac{1}{r_2}(1-n^2\cos^2\nu)+\frac{n}{r_1}\sin^2\nu\right]\Delta\zeta=0 \end{array}\right\}\text{7d)}.$$

Im Allgemeinen werden wir r_1 die Länge des Wegs, den die Strahlen im Prisma zurücklegen, vernachlässigen können gegen die Wege ausserhalb des Prisma r_0 und r_2. Multipliciren wir die vier Gleichungen mit r_1 und vernachlässigen dann die mit $\frac{r_1}{r_0}$ oder $\frac{r_1}{r_2}$ multiplicirten Glieder als unendlich klein, so erhalten wir folgende drei Gleichungen [7b) und 7d) geben zwei identische Gleichungen]

$$\left.\begin{array}{ll} \sin^2 m\,\Delta y-(\cos\varphi+\cos m\cos\mu)\,\Delta v-\cos m\cos\nu\,(\Delta z-\Delta\zeta) & =0 \\ -\cos m\cos\nu\,\Delta y-\cos\mu\cos\nu\,\Delta v+\sin^2\nu\,(\Delta z-\Delta\zeta) & =0 \\ -(\cos\varphi+\cos m\cos\mu)\,\Delta y+\sin^2\mu\,\Delta v-\cos\mu\cos\nu\,(\Delta z-\Delta\zeta) & =0 \end{array}\right\}\ldots 8).$$

Von diesen drei Gleichungen folgt aber wieder eine aus den beiden andern, so dass sie sich nach Elimination von $(\Delta z-\Delta\zeta)$ oder von Δv reduciren auf folgende beide:

$$\left.\begin{array}{l} (\cos\mu+\cos m\cos\varphi)\,\Delta y=(\cos m+\cos\mu\cos\varphi)\,\Delta v \\ \text{oder} \\ \frac{\Delta y}{y}=\frac{\Delta v}{v} \end{array}\right\}\ldots 8\text{a)}$$

und

$$\left.\begin{array}{l} (\Delta z-\Delta\zeta)(\cos m+\cos\mu\cos\varphi)=\cos\nu\sin^2\varphi\,\Delta y \\ \text{oder} \\ \frac{\Delta z-\Delta\zeta}{z-\zeta}=\frac{\Delta y}{y}=\frac{\Delta v}{v} \end{array}\right\}\ldots 8\text{b)}.$$

Diese beiden Gleichungen sind nur die Bedingungen dafür, dass die beiden Strahlen auf ihrem unendlich kurzen Wege durch das Prisma als merklich parallel angesehen werden können, was selbstverständlich der Fall sein muss, wenn ihre Convergenzpunkte im Vergleich zu ihrem Wege im Prisma unendlich weit entfernt sind.

So haben wir zunächst zwei der unbekannten Grössen Δv und $\Delta\zeta$ durch die beiden anderen Δy und Δz ausgedrückt. Wir müssen uns nun aus den Gleichungen 7) durch Elimination zwei neue Gleichungen bilden, welche die verschwindende Grösse r_1 nicht mehr enthalten, und aus welchen wir die Verhältnisse $\frac{\Delta z}{\Delta v}$ und $\frac{r_2}{r_0}$ bestimmen können.

Eine solche Gleichung erhalten wir, indem wir 7b) und 7d) addiren:

$$\left.\begin{array}{l} -\frac{n^2}{r_0}\cos m\cos\nu\,\Delta y+\frac{1}{r_0}(1-n^2\cos^2\nu)\,\Delta z+\frac{n^2}{r_2}\cos\mu\cos\nu\,\Delta v \\ \quad+\frac{1}{r_2}(1-n^2\cos^2\nu)\,\Delta\zeta=0 \end{array}\right\}\ldots 8\text{c)}.$$

Um die zweite zu erhalten, multipliciren wir die Gleichung 7 a) mit

$$y = \frac{r_1}{\sin^2\varphi}(\cos m + \cos\mu\cos\varphi),$$

die Gleichung 7 c) mit

$$v = \frac{r_1}{\sin^2\varphi}(\cos\mu + \cos m\cos\varphi),$$

die Gleichung 7 b) mit

$$z - \zeta = r_1 \cos\nu$$

und addiren die drei Gleichungen, so fallen die Glieder sämmtlich heraus, welche mit $\frac{1}{r_1}$ multiplicirt sind, und wir erhalten:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{y}{r_0}\left\{(1 - n^2\cos^2 m)\,\Delta y - n^2\cos m\cos\nu\,\Delta z\right\} \\ &\quad + \frac{z-\zeta}{r_0}\left\{- n^2\cos m\cos\nu\,\Delta y + (1 - n^2\cos^2\nu)\,\Delta z\right\} \\ &\quad + \frac{v}{r_2}\left\{1 - n^2\cos^2\mu)\,\Delta v + n^2\cos\mu\cos\nu\,\Delta\zeta\right\} = 0 \end{aligned}\right\}\ \ldots 8\text{d}).$$

Wenn man aus 8 a) und 8 b) die Werthe von Δv und $\Delta\zeta$ in Δy und Δz ausgedrückt nimmt, und sie in 8 c) und 8 d) substituirt, erhält man zwei Gleichungen, welche die unbekannten Grössen $\frac{\Delta z}{\Delta y}$ und $\frac{r_2}{r_0}$ enthalten. Eliminirt man eine von ihnen, so erhält man für die andere eine quadratische Gleichung, welche je zwei Werthe liefert. Da man so für jede Combination beliebig gewählter Werthe der Winkel m, μ, ν einen oder zwei bestimmte Zahlenwerthe des Verhältnisses $\frac{r_2}{r_0}$ bekommt, so ist für jede gegebene Richtung des Strahlenbündels r_2 proportional r_0, wenn dieses sich ändert. Wird r_0 unendlich gross, so wird es auch r_2. Die Eliminationsgleichungen hier hinzuschreiben, ist nicht nöthig. Wir wollen nur die besonderen Fälle untersuchen, welche uns für die Versuche interessiren.

Zuerst untersuchen wir, in welchen Fällen homocentrisches Licht nach der Brechung im Prisma homocentrisch bleibt. Wenn sich alle Strahlen schneiden sollen, welche vom leuchtenden Punkte ausgegangen sind, so müssen die Bedingungen des Schneidens 8 c) und 8 d) erfüllt sein, welches auch die Werthe von Δy und Δz sein mögen, die man wählt. Man kann also jede dieser Grössen für sich gleich 0 setzen, und erhält dadurch folgende Bedingungen.

1) Wenn man in 8 c) $\Delta y = 0$ setzt, wobei auch nach 8 a) und 8 b) $\Delta v = 0$ und $\Delta\zeta = \Delta z$

$$\left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_2}\right)(1 - n^2\cos^2\nu) = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9\text{a}).$$

Da nun nach 6 a) $n\cos\nu = \frac{c - z}{r_0}$, so kann der zweite Factor dieser Gleichung nur gleich Null werden, wenn $r_0 = c - z$, wenn also der Lichtstrahl die brechende Fläche streifte, wobei er nicht eindringen würde. Es muss also der erste Factor von 9 a) gleich Null sein, d. h.

$$r_2 = - r_0.$$

2) Wenn man in 8 d) $\Delta z = 0$ setzt, und $r_2 = -r_0$, so wird

$$0 = (1 + n^2 \sin^2\nu + n^2 \cos^2\nu)(\cos^2 m - \cos^2\mu).$$

Der erste Factor ist $1 + n^2$, also nie gleich Null, daraus folgt

$$\cos m = \pm \cos\mu \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9\text{b}).$$

3) Wenn man entweder in 8 c) $\Delta z = 0$, oder in 8 d) $\Delta y = 0$ setzt, und $r_2 = -r_0$, so wird mit Berücksichtigung von 6 b)

$$(1 - n^2)\cos\nu \sin^2\varphi = 0.$$

Da aber φ der brechende Winkel des Prisma ist, $\sin\varphi$ also nicht gleich Null werden darf, so folgt

$$\left.\begin{array}{l} \cos\nu = 0 \\ c = z = \zeta = \gamma \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9\text{c}).$$

Der Strahl liegt also ganz in einer auf der brechenden Kante senkrechten Ebene. Unter diesen Verhältnissen schreiben wir die Gleichung 9 b) gemäss 6 a) unter der Form

$$y - v\cos\varphi = \pm(v - y\cos\varphi)$$

$$y(1 \pm \cos\varphi) = \pm v(1 \pm \cos\varphi),$$

also

$$y = v \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9\text{d}).$$

Nun ist, wenn ε den Einfallswinkel an der ersten Fläche bezeichnet, ε_1 den Brechungswinkel, η_1 den (im Prisma liegenden) Einfallswinkel an der zweiten Fläche, η den (in der Luft liegenden) Brechungswinkel

$$\cos\varepsilon_1 = \frac{v\sin\varphi}{r_1}, \qquad \cos\eta_1 = \frac{y\sin\varphi}{r_1},$$

also unter den gemachten Voraussetzungen

$$\cos\varepsilon_1 = \cos\eta_1,$$

also auch

$$\sin\varepsilon = n\sin\varepsilon_1 = n\sin\eta_1 = \sin\eta,$$

d. h. die Winkel zwischen dem Strahl und den Einfallslothen beider Flächen sind auf beiden Seiten des Prisma gleich.

Diese Richtung, in welcher homocentrische Strahlen durch das Prisma gehen müssen, um homocentrisch zu bleiben, ist noch dadurch ausgezeichnet, dass in ihr auch die Ablenkung des Strahls von seinem ursprünglichen Wege ein Minimum ist.

Wenn wir die Coordinaten des ersten Systems a, b, c, x und y nach Gleichungen 5 a) in solche des zweiten Systems verwandeln, so erhalten wir die Cosinus der Winkel, welche der ankommende Strahl mit den Axen der α, β und γ im zweiten Systeme macht, beziehlich gleich

$$-\frac{a\cos\varphi + (b - y)\sin\varphi}{r_0}, \quad \frac{(b - y)\cos\varphi - a\sin\varphi}{r_0}, \quad \frac{c - z}{r_0};$$

die entsprechenden Cosinus der Winkel, welche der austretende Strahl mit den Axen der α, β und γ macht, sind

$$\frac{\alpha}{r_2}, \quad \frac{\beta - v}{r_2}, \quad \frac{\gamma - \zeta}{r_2}.$$

Wenn wir den Winkel zwischen der Richtung des ankommenden und der Richtung des ausgetretenen Strahls mit ω bezeichnen, so ist

$$\left.\begin{aligned}\cos\omega = & -\frac{[a\cos\varphi + (b-y)\sin\varphi]}{r_0}\frac{\alpha}{r_2} + \frac{[(b-y)\cos\varphi - a\sin\varphi]}{r_0}\frac{(\beta-v)}{r_2} \\ & + \frac{(c-z)}{r_0}\frac{(\gamma-\zeta)}{r_2}\end{aligned}\right\}\ldots 10).$$

Mittels der Gleichungen 5) und 6) kann man hieraus die Grössen a, b, c, α, β und γ eliminiren. Es ist zunächst

$$\left.\begin{aligned}\frac{a}{r_0} &= \sqrt{1 - n^2\frac{(y-v\cos\varphi)^2 + (z-\zeta)^2}{r_1^2}} = \sqrt{\frac{n^2 v^2 \sin^2\varphi}{r_1^2} - (n^2-1)} \\ \frac{\alpha}{r_2} &= \sqrt{1 - n^2\frac{(v-y\cos\varphi)^2 + (z-\zeta)^2}{r_1^2}} = \sqrt{\frac{n^2 y^2 \sin^2\varphi}{r_1^2} - (n^2-1)}\end{aligned}\right\} 10a).$$

Wenn eine der beiden Wurzeln imaginär werden sollte, haben wir an der entsprechenden Fläche totale Reflexion des Strahls. Für die Quotienten $\frac{b-y}{r_0}$, $\frac{c-z}{r_0}$, $\frac{\beta-v}{r_2}$, $\frac{\gamma-\zeta}{r_2}$ geben die Gleichungen 6) unmittelbar die passenden Werthe. Denkt man diese in den obigen Ausdruck von $\cos\omega$ eingesetzt, so erhält man $\cos\omega$ ausgedrückt durch y, v, z und ζ, und zwar kann man es leicht so einrichten, dass die beiden letzteren Grössen nur noch in r_1 enthalten darin vorkommen. Man erhält folgenden Werth:

$$\left.\begin{aligned}\cos\omega = & -n^2 + n^2\frac{\sin^2\varphi}{r_1^2}(y^2 - yv\cos\varphi + v^2) \\ & - n\frac{\sin\varphi}{r_1^2}(y - v\cos\varphi)\sqrt{n^2 y^2 \sin^2\varphi - (n^2-1)r_1^2} \\ & - n\frac{\sin\varphi}{r_1^2}(v - y\cos\varphi)\sqrt{n^2 v^2 \sin^2\varphi - (n^2-1)r_1^2} \\ & - \frac{\cos\varphi}{r_1^2}\sqrt{n^2 y^2\sin^2\varphi - (n^2-1)r_1^2}\sqrt{n^2 v^2 \sin^2\varphi - (n^2-1)r_1^2}\end{aligned}\right\} 10b).$$

Betrachten wir die Grössen x und y als constant, und suchen v und ζ so zu bestimmen, dass der Winkel ω ein Maximum wird, so müssen wir setzen

$$\frac{d\omega}{dv} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{d\omega}{d\zeta} = 0.$$

Die letztre Gleichung können wir, da ζ nur in r_1 erhalten im Werthe von $\cos\omega$ vorkommt, auch schreiben

$$\frac{d\omega}{d\zeta} = -\frac{1}{\sin\omega}\frac{d(\cos\omega)}{d(r_1^2)}\cdot(\zeta-z) = 0.$$

Diese Gleichung wird für alle Werthe von v erfüllt, wenn wir setzen

$$\zeta - z = 0.$$

Nur dann würde diese Annahme nicht hinreichen, wenn entweder $\sin\omega = 0$, der Strahl also gar nicht gebrochen würde, was nur bei parallelen brechenden Flächen

vorkommen kann, oder wenn der Differentialquotient von cos ω einen unendlichen Werth annehmen könnte, dadurch dass ein darin vorkommender Nenner gleich Null würde. Man sieht leicht aus 10 b), dass nur r_1 und die beiden Wurzeln im Nenner vorkommen können. Es kann aber r_1 nicht gleich Null werden, so lange y und v positive, wenn auch unendlich kleine Werthe haben, die sie haben müssen, wenn der Strahl durch das Prisma gehen soll. Es können ferner die Wurzeln wegen der Gleichungen 6 a) nicht gleich Null werden, wenn der Strahl in den Raum vor und hinter dem Prisma eintreten soll. Wir erfüllen also die Bedingung

$$\frac{d\omega}{d\zeta} = 0,$$

für alle Werthe von v, indem wir setzen

$$z = \zeta.$$

Daraus folgt, wie oben, nach den Gleichungen 6) auch

$$z = c \quad \text{und} \quad \zeta = \gamma,$$

sämmtliche Theile des Strahls verlaufen alsdann in einer auf der brechenden Kante (Axe der z) senkrechten Ebene.

Um die zweite Bedingung zu erfüllen, welche erfüllt werden muss, um ω zu einem Maximum zu machen, nämlich

$$\frac{d\omega}{dv} = 0,$$

können wir den Ausdruck für cos ω zuerst dadurch vereinfachen, dass wir darin $z = \zeta$ setzen, also

$$r_1^2 = y^2 + v^2 - 2yv\cos\varphi.$$

Führen wir statt v eine neue Variable q ein, indem wir setzen

$$v = qy,$$

so verschwindet aus dem Ausdruck für cos ω in Gleichung 10 b) mit v gleichzeitig auch y und cos ω wird eine Function von q allein

$$\cos\omega = \varphi_{(q)}.$$

Da nun aber cos ω seinen Werth behält, wenn wir überall die Buchstaben y und v mit einander vertauschen, so muss für jeden Werth von q sein

$$\cos\omega = \varphi_{(q)} = \varphi_{\left(\frac{1}{q}\right)}.$$

Setzen wir ferner

$$\frac{d\varphi_{(q)}}{dq} = \varphi^1_{(q)},$$

so ist

$$\frac{d\cos\omega}{dv} = \frac{1}{y}\cdot\varphi^1_{(q)} = -\frac{1}{y}\,\varphi^1_{\left(\frac{1}{q}\right)}\frac{1}{q^2}.$$

Für $v = y$, d. h. $q = 1$ wird

$$\varphi^1_{(1)} = -\varphi^1_{(1)},$$

woraus folgt

$$\varphi^1_{(1)} = 0,$$

also auch

$$\frac{d \cos \omega}{dv} = 0$$

und wenn nicht gleichzeitig $\sin \omega = 0$ auch

$$\frac{d\omega}{dv} = - \frac{d \cos \omega}{dv} \cdot \frac{1}{\sin \omega} = 0.$$

Wenn also

$$z = \zeta \text{ und } y = v$$

ist gleichzeitig

$$\frac{d\omega}{d\zeta} = 0 \text{ und } \frac{d\omega}{dv} = 0$$

und ω ein Grenzwerth. Die Untersuchung der zweiten Differentialquotienten zeigt, dass ω in diesem Falle ein Maximum ist. Der Winkel zwischen der Verlängerung des eintretenden Strahls und dem gebrochenen Strahle, welcher der Nebenwinkel von ω ist und die Ablenkung des Strahls von seiner ursprünglichen Bahn misst, wird dabei ein Minimum.

Der Maximalwerth von ω findet sich, wenn man in 10b) $y = v$ und $z = \zeta$ setzt

$$\omega = \varphi + 2 \, arc \cos \left[n \sin \frac{\varphi}{2} \right] \quad \ldots \ldots \quad 10c).$$

Ein unendlich dünnes Bündel homocentrischer Strahlen, welches von einem endlich entfernten Punkte ausgeht, bleibt nach dem Durchtritt durch ein Prisma also nur dann homocentrisch, wenn es im Minimum der Ablenkung durchgetreten ist, d. h. wenn es in einer zur brechenden Kante senkrechten Ebene verläuft, und gegen beide Prismenflächen unter gleichen Winkeln geneigt ist.

Unter diesen Umständen wird also vom leuchtenden Punkte durch das Prisma ein potentielles Bild entworfen, welches auf derselben Seite und in derselben Entfernung vom Prisma liegt, wie sein Object. Das Bild liegt aber an einem anderen Orte, vom Prisma gesehen um den Winkel $\frac{\pi}{2} - \omega$ verschoben nach der Seite der brechenden Kante hin.

Nicht homocentrische Brechung.

Wenn ein Lichtpunkt betrachtet wird, kann sein Bild nur unter der Bedingung deutlich sein, dass das gebrochene Licht homocentrisch sei. Wird aber eine Lichtlinie betrachtet, so schaden Abweichungen der Strahlen, die in Richtung des Bildes dieser Linie liegen, nicht der Genauigkeit des Bildes. Dies ist nun der gewöhnliche Fall im Spectrum. Ist nun die Lichtlinie der brechenden Kante des Prisma oder der Axe der z parallel, so schaden Abweichungen in Richtung der z nichts, wohl aber solche in der darauf senkrecht stehenden durch den Strahl gelegten Ebene. Sollen Abweichungen nur in Richtung der z vorkommen, so müssen wir in den Gleichungen 8) $\Delta y = 0$ setzen, also auch $\Delta v = 0$ $\Delta z = \Delta \zeta$ und erhalten aus 8c) und 8d)

$$\left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_2} \right) (1 - n^2 \cos^2 \nu) = 0,$$

also

$$r_2 = - r_0 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11a)$$

und zweitens

$$(1 - n^2) \cos \nu \sin^2 \varphi = 0,$$

woraus wie oben folgt:

$$\cos \nu = 0$$

$$c - z = z - \zeta = \gamma - \zeta = 0.$$

Wenn die letztere Bedingung erfüllt ist, liegen die Abweichungen Δy in einer durch den Strahl senkrecht gegen die Δz gelegten Ebene. Ihnen entspricht also die zweite Convergenzebene, welche senkrecht auf der bisher betrachteten sein muss. Die zugehörige Vereinigungsweite der Strahlen für die auf der brechenden Kante senkrechte Convergenzebene ergiebt sich, wenn wir in 8 d) $\Delta z = 0$ setzen und $\cos \nu = 0$, woraus auch $\Delta \zeta = 0$ folgt

$$\frac{1}{r_0}(1 - n^2 \cos^2 m)\, y^2 + \frac{1}{r_2}(1 - n^2 \cos^2 \mu)\, \nu^2 = 0.$$

oder wenn wir wie vorher die Einfallswinkel an den beiden Prismenflächen in Luft mit ε und η, im Glas mit ε_1 und η_1 bezeichnen

$$\cos \varepsilon_1 = \frac{v \sin \varphi}{r_1} \qquad \cos \eta_1 = \frac{y \sin \varphi}{r_1}$$

$$\sin \varepsilon = n \sin \varepsilon_1 = n \frac{y - v \cos \varphi}{r_1} = n \cos m$$

$$\sin \eta = n \cos \mu,$$

so folgt

$$\frac{r_2}{r_0} = - \frac{\cos^2 \varepsilon_1 \cos^2 \eta}{\cos^2 \varepsilon \cos^2 \eta_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11\text{ b)}$$

oder

$$r_2 \frac{\cos^2 \eta_1}{\cos^2 \eta} = - r_0 \frac{\cos^2 \varepsilon_1}{\cos^2 \varepsilon}$$

$$r_2 \left[1 + \frac{n^2 - 1}{\cos^2 \eta}\right] = - r_0 \left[1 + \frac{n^2 - 1}{\cos^2 \varepsilon}\right].$$

In dieser letzten Form erkennt man leicht, dass r_2 wächst, r_0 abnimmt, wenn η abnimmt und ε wächst. Die grössere Vereinigungsweite kommt also den Strahlen auf der Seite des Prisma zu, wo der Einfallswinkel kleiner ist.

Im Minimum der Ablenkung, wo $\varepsilon = \eta$, wird auch $r_2 = -r_0$, die Vereinigungsweite in der zur brechenden Kante senkrechten Ebene also gleich weit mit der Vereinigungsweite in der jener Kante parallelen Ebene.

Das Bild einer der brechenden Kante parallelen leuchtenden Linie wird da entworfen, wo die Vereinigung der Strahlen in einer zur brechenden Kante senkrechten Ebene stattfindet nach Gleichung 11 b). Die Entfernung des Bildes einer der brechenden Kante parallelen Lichtlinie vom Prisma ist also grösser als die Entfernung des Objects, wenn der Einfallswinkel an der ersten Fläche des Prisma, auf welches die Lichtstrahlen fallen, grösser ist als beim Minimum der Ablenkung. Die Entfernung des Bildes ist dagegen kleiner als die des Objects, wenn jener Einfallswinkel kleiner ist.

Betrachtet man also eine solche Lichtlinie durch ein Prisma mit blossem Auge oder mit dem Fernrohr, so muss man für das Minimum der Ablenkung Auge oder Fern-

rohr für die Entfernung des wirklichen Objects einrichten. Wenn man aber das Prisma dann um eine der brechenden Kante parallele Axe dreht, muss man auch die Einrichtung des Auges oder Fernrohrs passend abändern. Nur wenn das Object unendlich weit entfernt ist, ist auch das Bild unendlich weit entfernt, und die Einrichtung des Auges oder Fernrohrs kann für jede Stellung des Prisma dieselbe bleiben.

Wenn der leuchtende Gegenstand eine verticale helle Linie ist, welche einfarbiges, z. B. rothes Licht aussendet, so ist ihr Bild, wie es durch ein vertical stehendes Prisma erscheint, wieder eine verticale Linie. Geht von der leuchtenden Linie auch noch violettes Licht aus, so entwirft das Prisma auch mittels der violetten Strahlen ein Bild, welches eine verticale Linie ist, die aber weiter entfernt von dem leuchtenden Objecte ist, als die rothe Linie, weil das violette Licht stärker gebrochen wird. Geht endlich von der leuchtenden Linie Licht von allen Graden der Brechbarkeit aus zwischen Roth und Violett, so entspricht jedem einzelnen Grade der Brechbarkeit ein besonderes Bild der verticalen Linie und diese linienförmigen Bilder reihen sich zwischen dem rothen und violetten Bilde ein in der Ordnung ihrer Brechbarkeit, und bilden ein Spectrum von rechteckiger Gestalt. Sind in dem Lichte des leuchtenden Objects Strahlen von allen continuirlich in einander übergehenden Graden der Brechbarkeit enthalten, so bildet auch das Spectrum eine continuirlich leuchtende Fläche. Fehlen einzelne Stufen der Brechbarkeit, so fehlen auch im Spectrum die entsprechenden linienförmigen Bilder, und man sieht an ihrer Stelle dunkle verticale Linien das Spectrum durchziehen, die Fraunhofer'schen Linien.

Scheinbare Breite der prismatischen Bilder.

Da man nun leuchtende geometrische Linien nicht herstellen kann, sondern bei den Versuchen immer schmale leuchtende Flächen als Objecte benutzen muss, so haben auch deren Bilder eine gewisse Breite, welche wir jetzt bestimmen wollen.

Nennen wir wieder ε und ε_1 Einfalls- und Brechungswinkel an der ersten, η_1 und η Einfalls- und Brechungswinkel an der zweiten Fläche, so dass die Winkel ε_1 und η_1 innerhalb des Prisma liegen, den brechenden Winkel selbst φ, so ist

$$\left.\begin{aligned} \sin\varepsilon &= n \sin\varepsilon_1 \\ \sin\eta &= n\sin\eta_1 \\ \eta_1 + \varepsilon_1 &= \varphi \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 12).$$

Nun sei der Spalt sehr weit entfernt und der sehr kleine Gesichtswinkel, unter dem er vom Orte des Prisma aus gesehen wird, sei $d\varepsilon$, so dass der Einfallswinkel des Lichtes vom einen Rande des Spalts ε, vom anderen $\varepsilon + d\varepsilon$ sei. Die Winkel ε_1, η_1 und η werden für diesen letzteren Strahl beziehlich $\varepsilon_1 + d\varepsilon_1$, $\eta_1 + d\eta_1$ und $\eta + d\eta$. Aus den obigen Gleichungen 12) folgt dann durch Differentiiren:

$$\begin{aligned} \cos\varepsilon\, d\varepsilon &= n\cos\varepsilon_1\, d\varepsilon_1 \\ \cos\eta\, d\eta &= n\cos\eta_1\, d\eta_1 \\ d\eta_1 + d\varepsilon_1 &= 0. \end{aligned}$$

Durch Elimination von $d\varepsilon_1$ und $d\eta_1$ erhält man

$$-\frac{\cos\varepsilon \cdot \cos\eta_1}{\cos\eta \cdot \cos\varepsilon_1}\, d\varepsilon = d\eta \quad \ldots\ldots\ldots \quad 12a),$$

$d\eta$ ist der Gesichtswinkel, unter dem der Spalt nach der Brechung im Prisma erscheint; seine Grösse ist durch diese Gleichung gegeben. Geschieht diese Brechung im Minimum der Ablenkung, so dass

$$\varepsilon = \eta, \quad \varepsilon_1 = \eta_1,$$

so wird

$$-d\varepsilon = d\eta.$$

Die scheinbare Grösse des Spalts bleibt also unter diesen Umständen unverändert.

Der grösste Werth für ε ist ein rechter Winkel; wenn der Strahl längs der brechenden Fläche nach der brechenden Kante hinläuft, dann bleiben die anderen Winkel spitze Winkel, so dass ihre Cosinus nicht gleich Null werden, und es wird

$$d\eta = 0$$

Bei dieser Stellung ist also das Bild des Spaltes unendlich schmal; aber man kann bei praktischen Anwendungen sich der streifenden Incidenz des Lichtes wohl nähern, aber sie natürlich nie ganz erreichen. Das Entgegengesetzte ist der Fall, wenn man das Prisma so hält, dass das austretende Licht die Fläche beinahe streift, dass also $\cos\eta$ nahehin gleich Null wird. Dann ist

$$\frac{d\eta}{d\varepsilon} = -\infty.$$

Ist r_0 die Entfernung des Spaltes vom Prisma und r_2 die scheinbare Entfernung seines Bildes vom Prisma für horizontal divergente Strahlen, so folgt aus 11 b), dass

$$\sqrt{r_0} : \sqrt{r_2} = d\eta : d\varepsilon \quad \ldots\ldots\ldots \quad 12\text{b}).$$

Reinheit des Spectrum. Je kleiner der Unterschied dn des Brechungsverhältnisses derjenigen Farben ist, die an demselben Orte des Spectrum zusammentreffen, desto reiner ist das Spectrum, wir können also die Grösse des angegebenen dn als Maass der Unreinheit betrachten.

Wenn wir als gebrochenen Strahl denjenigen festhalten, welcher von dem betreffenden Orte des Spectrum nach dem Knotenpunkte des Auges verläuft, so ist dessen Lage, also auch der Winkel η fest gegeben. Dagegen variirt der Winkel ε für Strahlen, die von verschiedenen Theilen des Spaltes kommen, und das Brechungsverhältniss variirt für verschiedene Farben. Betrachten wir nun in den drei Gleichungen

$$\begin{aligned} \sin\varepsilon &= n\sin\varepsilon_1 \\ \sin\eta &= n\sin\eta_1 \\ \eta_1 + \varepsilon_1 &= \varphi \end{aligned}$$

φ und η als constant, ε, ε_1, η_1 und n als variabel, so erhalten wir durch Differentiation folgende Gleichungen

$$\begin{aligned} \cos\varepsilon\, d\varepsilon &= \sin\varepsilon_1\, dn + n\cos\varepsilon_1\, d\varepsilon_1 \\ 0 &= \sin\eta_1\, dn + n\cos\eta_1\, d\eta_1 \\ d\eta_1 + d\varepsilon_1 &= 0. \end{aligned}$$

Durch Elimination von $d\varepsilon_1$ und $d\eta_1$ erhalten wir

$$\begin{aligned} \cos\varepsilon\cdot\cos\eta_1\cdot d\varepsilon &= (\sin\varepsilon_1\cos\eta_1 + \cos\varepsilon_1\sin\eta_1)\, dn \\ &= \sin\varphi\cdot dn. \end{aligned}$$

Wenn wir unter $d\varepsilon$ die scheinbare Breite des Spaltes vom Prisma aus gesehen verstehen, ist das Maass der Unreinheit des Spectrum

$$dn = \frac{\cos\varepsilon\cdot\cos\eta_1}{\sin\varphi}\, d\varepsilon \quad \ldots\ldots\ldots \quad 13).$$

Wenn ε sich einem rechten Winkel nähert, also bei streifender Incidenz des Lichts, wird $\cos\varepsilon = 0$, und demnach auch $dn = 0$. Das Spectrum wird dann also bei

gegebener Grösse des Spaltes am reinsten, aber gleichzeitig wird auch die Apertur des Prisma bei so schiefer Incidenz sehr klein, der Lichtverlust durch Reflexion sehr gross, so dass es im Ganzen vortheilhafter bleibt, die Reinheit des Spectrum durch Verengerung des Spaltes (Verkleinerung von $d\varepsilon$) zu erreichen, was ja meist keine Schwierigkeiten hat.

Was die Helligkeit des Spectrum betrifft, so verhält sich die Helligkeit h des Spaltes, die er für irgend eine einzelne homogene Farbe hat, zu der seines Bildes umgekehrt wie seine Breite $d\varepsilon$ zu der des Bildes $d\eta$, wenn man übrigens von den Verlusten absieht, die das Licht durch Reflexion an den Glasflächen erleidet, und wenn die Apertur des Prisma grösser als die Pupille ist, oder beim Gebrauch eines Fernrohrs grösser als das Objectivglas. Also

$$h d\varepsilon = h_1 d\eta$$

oder mit Benutzung des früher gefundenen Verhältnisses von $d\varepsilon$ und $d\eta$

$$h_1 = h \frac{\cos\eta \cos\varepsilon_1}{\cos\varepsilon \cos\eta_1}.$$

Nun ist die Helligkeit H irgend einer Stelle des Spectrum aber gleich der Summe der Helligkeiten h_1 aller einzelnen homogenen Farben, welche sich dort decken. Im Allgemeinen können wir annehmen, dass einfache Farben von sehr kleinem Unterschiede der Wellenlänge λ dieselbe Helligkeit haben. Bezeichnen wir also mit $d\lambda$ und dn dies Intervall der Wellenlänge und Brechbarkeit, innerhalb deren die sich deckenden Farben liegen, so können wir setzen

$$H = h_1 d\lambda = h_1 \frac{d\lambda}{dn} dn,$$

woraus mit Berücksichtigung des in 13) gefundenen Werthes von dn folgt:

$$H = h \frac{\cos\eta \cos\varepsilon_1}{\sin\varphi} d\varepsilon \cdot \frac{d\lambda}{dn},$$

wo $d\varepsilon$ die scheinbare Breite des Spaltes bezeichnet. Um die Bedeutung dieses Ausdruckes für H zu verstehen, bemerken wir noch, dass wenn wir unter Voraussetzung einer geometrischen Lichtlinie statt des Spaltes den Gesichtswinkel $d\eta$ bestimmen, unter welchem die innerhalb des Intervalls dn vorkommenden Farben in dem ideell reinen Spectrum erscheinen, sich das Verhältniss $\frac{d\eta}{d\lambda}$, dessen Werth wir mit l bezeichnen wollen, durch eine ähnliche Differentiation wie vorher findet

$$\frac{d\eta}{dn} = \frac{d\eta}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dn} = l \frac{d\lambda}{dn} = \frac{\sin\varphi}{\cos\eta \cos\varepsilon_1}.$$

Dann wird

$$H = \frac{h \cdot d\varepsilon}{l}.$$

Abgesehen also von dem Verluste durch Reflexion und Absorption, ist die Helligkeit des Spectrum, unabhängig von der Brechkraft des Prisma und den Brechungswinkeln, direct proportional der Helligkeit der betreffenden Farben im Spectrum, der scheinbaren Breite des Spaltes und umgekehrt proportional der scheinbaren Länge des betreffenden Theils des Spectrum.

Wenn die Brechung im Minimum der Ablenkung geschieht, ist die scheinbare Breite des Spaltes der seines Bildes gleich, und man kann $\frac{l}{d\varepsilon}$ als Maass der Reinheit des Spectrum betrachten. Dann ist also die Helligkeit des Spectrum bei gleichbleibender Helligkeit des durch den Spalt dringenden Lichts einfach umgekehrt proportional seiner Reinheit. Daraus folgt denn, dass zur Erreichung der grössten Reinheit auch das intensivste Licht nöthig ist.

Dagegen würde es theoretisch möglich sein, etwas grössere Helligkeit bei gleicher Reinheit des Spectrum zu gewinnen, wenn man den Einfallswinkel an der ersten brechenden Fläche vergrössert, und den Spalt breiter macht; um aber die Länge des Spectrum constant zu erhalten, müsste man auch noch den brechenden Winkel vergrössern. Indessen lässt sich praktisch dadurch nichts gewinnen, weil der Lichtverlust durch Reflexion immer grösser wird, und die kleinen Abweichungen der brechenden Flächen von einer vollkommenen Ebene das Bild desto mehr verwirren, je grösser der Einfallswinkel ist.

Bisher ist der Gebrauch des Prisma ohne Vergrösserungsgläser vorausgesetzt worden. Das prismatische Spectrum kann nun aber auch wie jedes andere optische Bild als Object für ein Fernrohr gebraucht und beliebig vergrössert werden. Dabei wird die Reinheit des Spectrum natürlich nicht verändert, und wenn das Fernrohr eine hinreichend grosse Apertur hat, um die gesehenen Gegenstände in ihrer natürlichen Helligkeit zu zeigen, und die Apertur des Prisma dieser gleichkommt, so ist auch die Helligkeit des vergrösserten Bildes unverändert. Auch bleiben die in dem Vorausgehenden hingestellten Regeln über Helligkeit und Reinheit des Spectrum unverändert, wenn man unter $d\varepsilon$ die scheinbare Grösse des Spaltes, unter $d\eta$ die seines Bildes, unter l die Länge des bestimmten Theils des Spectrum versteht, wie sie durch das Fernrohr erscheinen. Aus der für die Helligkeit hingestellten Bedingung ergiebt sich übrigens, warum für Versuche ohne Fernrohr ganz kleine Prismen ausreichen, während man für Fernrohrversuche desto grössere haben muss, je stärker die Vergrösserung.

Bei der Einstellung des Fernrohrs auf das Spectrum hat man noch zu beachten, dass die Farbenstreifen und dunkeln Linien scharf erscheinen, wenn die horizontal divergirenden Strahlen vereinigt werden (Spalt und brechende Kante, wie hier immer, senkrecht gedacht), die obere und untere Begrenzungslinie des Spectrum dagegen und andere horizontale Linien, die durch kleine Unregelmässigkeiten der Grenzen des Spaltes oder durch Staubfäden in ihm leicht im Spectrum entstehen können, scharf erscheinen, wo die vertical divergirenden Strahlen vereinigt werden. Nur bei der Stellung des Prisma daher, welche das Minimum der Ablenkung giebt, kann man das Fernrohr gleichzeitig auf die verticalen und horizontalen Linien einstellen. Und zwar braucht man bei vollkommen ebenen Prismenflächen dazu dieselbe Einstellung des Fernrohrs, wie um den Spalt direct ohne Prisma deutlich zu sehen. Dreht man, vom Minimum der Ablenkung ausgehend, dagegen die brechende Kante des Prisma mehr gegen das Objectivglas des Fernrohrs hin, so muss man für die Farbenstreifen und dunkeln Linien eine Einstellung auf grössere Entfernung nehmen, bei einer entgegengesetzten Drehung des Prisma dagegen auf eine kleinere Entfernung, während die Einstellung für die horizontalen Linien in beiden Fällen unverändert bleibt.

Um ein Spectrum herzustellen, lässt man Licht durch einen engen Spalt auf ein Prisma fallen, das hindurchgegangene Licht kann man entweder direct in das Auge oder ein Fernrohr fallen lassen, oder es durch eine Linse zu einem objectiven Bilde des Spectrum condensiren.

Als Lichtquelle kann man jeden leuchtenden Körper benutzen, bekanntlich ist die Helligkeit der einzelnen Farben in dem Lichte verschiedener selbstleuchtender Körper, irdischer

sowohl als himmlischer von verschiedener Stärke, die Anordnung der dunkeln und hellen Linien ist verschieden. Will man das Spectrum des Sonnenlichts zu den Versuchen benutzen, so genügt für Spectren, in denen man nur die gröberen dunkeln Linien und nur die gewöhnlich sichtbaren Farben sehen will, das von einem Spiegel reflectirte Licht des Himmels oder ein von der Sonne beschienenes Papierblatt; nur ist in dem ersteren das Gelb und Orange ein wenig schwach. Man hat hierbei den Vortheil, dass diese Art der Beleuchtung lange Zeit unverändert sich erhält. Um die stärkeren dunkeln Linien *D*, *F* und *G* zu sehen, genügt schon ein Spalt von 1 Mm. Breite in 400 Mm. Entfernung durch ein Flintglasprisma, dessen brechender Winkel 50° beträgt, mit blossem Auge betrachtet; entfernt man sich doppelt so weit vom Spalte, so sieht man schon die meisten von Fraunhofer mit grossen Buchstaben bezeichneten Linien. Man muss nur gerade die Stellung des Prisma suchen, bei welcher sich das Auge für die Linien accommodiren kann.

Braucht man ein Spectrum von grösserer Reinheit, in welchem auch die feineren dunkeln Linien sichtbar werden sollen, oder will man die äussersten Grenzen des Spectrum sichtbar machen, so muss man einen Spiegel aufstellen, welcher Licht von den der Sonne benachbarten Theilen des Himmels, oder von der Sonne selbst durch den Spalt auf das Prisma wirft, und diesen Spiegel, da die Sonne ihren Ort am Himmel ändert, entweder etwa alle drei Minuten von neuem einstellen, oder ihn an einen Heliostaten befestigen, welcher ihm eine entsprechende Bewegung mittheilt.

Den Spalt, durch welchen das Licht dringt, und welcher das eigentliche Object des prismatischen Bildes ist, kann man für Versuche, bei denen es nicht auf die feineren dunkeln Linien ankömmt, oder wenn man seine Entfernung vom Prisma sehr gross machen kann, leicht aus undurchsichtigem Papier schneiden. Muss man dagegen einen sehr feinen Spalt anwenden, so dienen dazu am besten die Gravesande'schen Schneiden. Auf einer viereckigen Messingplatte *Fig. 109* sind zwei gerade Schienen *ab*, *ab* befestigt, zwischen deren Enden *aa* eine Platte *aa cc* festliegt, deren Rand *cc* zugeschärft ist. Ihm gegenüber steht der zugeschärfte Rand *dd* einer anderen zwischen den Schienen verschiebbaren Platte *dd ee*. Letztere wird mittels einer Schraube *f* mit sehr feinen Windungen, deren Mutter in dem auf der Grundplatte drehbar befestigten Zapfen *g* liegt, bewegt. Man kann auf diese Weise die beiden Schneiden *cc* und *dd* in sehr kleine Entfernungen von einander fein einstellen, wobei sie, wenn das Instrument gut gearbeitet ist, stets parallel bleiben. Die Grundplatte hat an der den Schneiden entsprechenden Stelle einen Ausschnitt, welcher das zwischen den Schneiden durchgegangene Licht frei weiter gehen lässt.

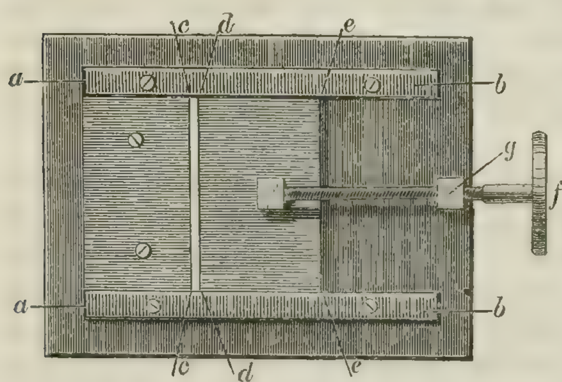


Fig. 109.

Die Gravesande'schen Schneiden müssen in der Mitte eines hinreichend grossen dunkeln Schirms befestigt und ihre dem Beobachter zugekehrte Seite selbst geschwärzt sein. Der Schirm muss gross genug sein, dass in der Nähe des Spaltes nirgends ein beleuchteter Gegenstand sichtbar ist, dessen Spectrum bis zu dem des Spaltes hinreichen könnte. Bei allen Versuchen, wo nicht die vollständige Entfernung der letzten Reste weissen Lichtes erfordert wird, kommt es mehr darauf an, dass der Schirm, in welchem sich der Spalt befindet, gleichmässig dunkel, als dass er absolut dunkel sei. Ueberall wo eine Verschiedenheit der Beleuchtung, selbst nur der Gegensatz von Sammetschwarz und Grauschwarz sich findet, zeigt das Prisma Farben, während eine gleichmässig beleuchtete Fläche dergleichen nicht zeigt. Man kann also eine grosse Zahl solcher Versuche vollständig gut in einem hellen Zimmer ausführen, wenn man nur den Spalt in einem genügend grossen und gleichmässig schwarz gefärbten Schirm anbringt.

Wenn es dagegen auf vollständige Entfernung des weissen Lichtes ankommt, wie bei den Versuchen, welche die Unzerlegbarkeit und Unveränderlichkeit des homogenen Lichtes

nachweisen sollen, und bei den Untersuchungen der Grenzen des Spectrum, muss der Schirm, in welchem sich der Spalt befindet, absolut dunkel sein. Am leichtesten ist dies zu erreichen, wenn man über ein zu optischen Versuchen eingerichtetes dunkles Zimmer mit verschlossenen und dicht eingefugten Fensterläden verfügen kann. Man setzt dann die Platte mit den Schneiden gleich in eine Oeffnung der Läden selbst ein. Uebrigens lässt sich dasselbe oft auch in den gewöhnlichen Wohnzimmern erreichen, wenn man die Fenstervorhänge und Fensterläden bis auf eine schmale Spalte schliesst, durch welche das Licht einfällt. Die Spalte wird im Boden eines schwarz ausgestrichenen Kastens angebracht, dessen offene Mündung dem Beobachter zugekehrt ist. Die Seitenwände des Kastens halten das seitlich einfallende Licht vom Grunde des Kastens ab, so dass dieser schon sehr dunkel wird. Neben den Spalt klebt man dann zwei Streifen schwarzen Sammets in den Grund des Kastens, deren Breite der Länge des Spaltes gleich ist, und deren Länge die Länge des auf die Ebene des Spaltes projicirten Spectrum um etwas übertrifft, so dass sich das ganze Spectrum auf der Fläche des Sammets entwirft. Ausserdem muss man durch Aufstellung passender dunkler Schirme dafür sorgen, dass kein Licht von den noch übrig gebliebenen helleren Stellen des Zimmers auf das Prisma oder die Linsen des Fernrohrs und das Auge des Beobachters fällt.

Die Herstellung eines absolut dunkeln Schirms in einem dunkeln Zimmer genügt aber noch nicht, um das Spectrum von den letzten sichtbaren Resten weissen Lichtes zu befreien, so lange noch intensives Licht von mehreren Farben das Prisma selbst die Linsen des Fernrohrs und das Auge des Beobachters trifft. In der oben entwickelten Theorie für die Entstehung der prismatischen Bilder haben wir nur das regelmässig gebrochene Licht berücksichtigt. Wir müssen aber bedenken, dass an jeder brechenden Fläche auch noch Licht reflectirt wird, und in jeder festen oder flüssigen durchsichtigen Substanz eine kleine Menge Licht unregelmässig nach allen Richtungen hin zerstreut wird.

Was zunächst die Reflexionen betrifft, so kommen dergleichen erstens im Prisma vor, wenn diejenige Fläche des Prisma, welche der brechenden Kante gegenüber liegt, nicht mit schwarzer Oelfarbe oder Asphaltlack überzogen und ihrer Reflexionsfähigkeit beraubt ist. Ist sie matt geschliffen, so wird sie in der Regel, so oft Licht durch das Prisma geht, erleuchtet werden. Ist in *Fig. 110* $abcd$ der Weg eines von d kommenden Strahles, und bei a das Auge des Beobachters, so erblickt der letztere in der scheinbaren Lage $f\varepsilon$ ein Spiegelbild der Fläche fe des Prisma, welches hell erscheint, wenn diese Fläche erleuchtet ist, und also diffuses weisses Licht im Gesichtsfelde des Beobachters verbreitet. Ist die Fläche fe dagegen auch polirt, so reflectirt sie das Licht regelmässig, und namentlich bei Prismen, deren Querschnitt ein gleichschenkliges Dreieck ist, gelangt ausser dem Wege $dcba$ auch noch Licht auf dem Wege $dcbgcba$ nach drei Reflexionen bei b, g und c nach a. Dieses Licht ist nicht in Farben zerlegt, sondern weiss. Der Beobachter sieht vermittels dieses Lichts ein schwaches weisses Bild des Spaltes in seinem Gesichtsfelde und kann es benutzen, um das Minimum der Ablenkung genau hervorzubringen. Bei Prismen, deren Querschnitt ein gleichschenkliges Dreieck ist, fällt nämlich dieses weisse Bild genau mit der Farbe des Spectrum zusammen, welche im Minimum der Ablenkung steht. Ein solches genau begrenztes schwaches weisses Bild des Spalts ist allerdings bei unseren Versuchen weniger zu fürchten, weil es einen verhältnissmässig kleinen Theil des Gesichtsfeldes einnimmt, es ist weniger schädlich, als das Spiegelbild der Fläche fe, wenn diese matt geschliffen ist. Dagegen kann nun auch durch diese Fläche Licht von seitlichen Gegenständen in das Auge des Beobachters kommen, für dessen Abblendung man sorgen muss. Am besten ist es jedenfalls, mit Ausnahme der beiden brechenden Flächen des Prisma alle übrigen zu schwärzen.

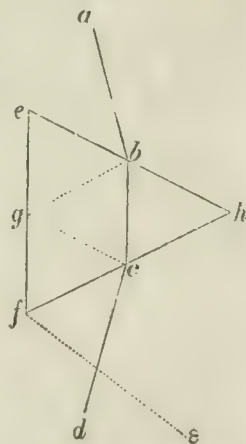


Fig. 110.

Wenn man das Spectrum durch ein Fernrohr beobachtet, kommen auch die Reflexionen an den vorderen und hinteren Flächen der Linsen in Betracht. Es werden dadurch kleine lichtschwache regelmässige Bildchen der vor dem Fernrohr liegenden Objecte entworfen, die

aber meist so liegen, dass der Beobachter sein Auge nicht für sie accommodiren kann, und die deshalb eine schwache weisse Beleuchtung des Gesichtsfeldes geben. Man bemerkt diese Beleuchtung leicht, wenn man ein Fernrohr auf einen tiefschwarzen Gegenstand richtet, während seitwärts sich sehr helle befinden. Das Gesichtsfeld grenzt sich dann als schwach erleuchtet gegen die schwarze Blendung des Oculars ab.

Einen ähnlichen, aber schwerer zu beseitigenden Effect hat die Zerstreuung des Lichts in den Glasmassen. Eine jede noch so klare Glasmasse erscheint weisslich trübe, sobald man sie scharf von der Sonne beschienen vor dunklem Grunde betrachtet, namentlich wenn das Auge sich nahehin in der Richtung der durchgelassenen Strahlen befindet. Dasselbe ist, wie wir schon früher bemerkt haben [1], der Fall mit der Hornhaut und Linse des menschlichen Auges. Wir müssen also berücksichtigen, dass jede der vom Lichte durchlaufenen Glasmassen eine, wenn auch verhältnissmässig kleine Menge des Lichtes, welches überhaupt durch sie hingeht, diffus zerstreut und mit solchem Licht das Gesichtsfeld des Beobachters anfüllt. Ebenso ist auch stets eine sehr kleine Menge von jeder Art Licht, welche überhaupt in das Auge dringt, über die ganze Netzhaut ausgebreitet. Solches unregelmässig zerstreute Licht ist allerdings von ausserordentlich geringer Lichtstärke, wenn man es mit dem regelmässig gebrochenen oder reflectirten Lichte vergleicht. Doch wird es merklich, wenn man sehr lichtschwache Theile des Spectrum zu untersuchen hat. Es ist z. B. der Grund, warum man bei den gewöhnlichen Einrichtungen der Spectralversuche das äusserste Roth der Linie *A* und das Ultraviolett nicht wahrnimmt, und es macht sich auch sehr bemerklich, wenn man einzelne Stellen des Spectrum durch farbige Gläser oder Flüssigkeiten sehr abschwächt, dann kann der Farbenton solcher Stellen durch das diffus im Gesichtsfelde verbreitete schwache Licht sehr beträchtlich geändert werden.

Diese Schwierigkeiten lassen sich bei Untersuchungen über lichtschwache Theile des Spectrum nur dadurch vollständig überwinden, dass man durch den Spalt nur noch solches Licht in grösserer Stärke auf das Prisma und Fernrohr fallen lässt, als gerade untersucht werden soll, und alles Licht anderer Art, so weit man kann, ausschliesst. In einzelnen Fällen kann man dies einfach dadurch erreichen, dass man farbige Gläser zwischen die Lichtquelle und den Spalt einschaltet, z. B. rothes Glas, um die Grenze des äussersten Roth im Spectrum sichtbar zu machen. Allgemeiner und vollständiger erreicht man den Zweck, wenn man hintereinander zwei Spalten und zwei Prismen aufstellt, in der Weise, dass durch den zweiten Spalt, dessen Bild das Spectrum geben soll, nur noch Licht der betreffenden Art hindurchgeht. Das Schema dieser Anordnung ist in *Fig. 111* gegeben. Der einfallende Licht-

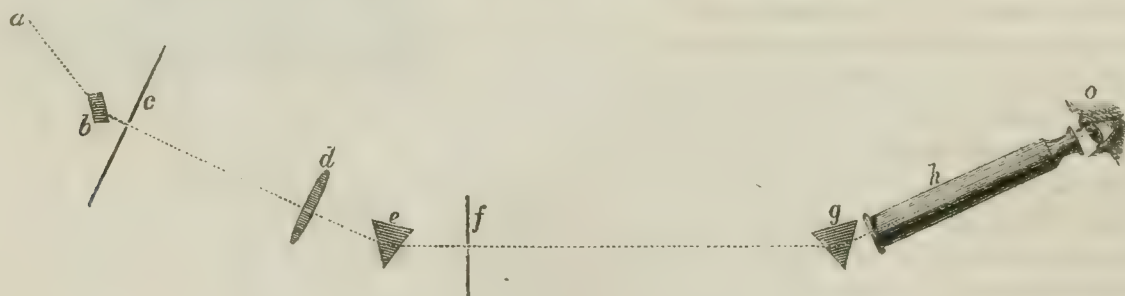


Fig. 111.

strahl *ab* trifft bei *b* auf den Spiegel des Heliostaten, geht durch einen Spalt in dem Schirme *c*, der im Allgemeinen nicht sehr eng zu sein braucht, fällt dann auf die Linse *d* und das Prisma *e* auf den Schirm *f*, welcher so weit von der Linse absteht, dass die vom Spalte *c* ausgegangenen Strahlen auf ihm vereinigt werden, so dass auf ihm ein in ein Spectrum ausgezogenes Bild dieses Spaltes entsteht. Dieses erste Spectrum braucht im Allgemeinen nicht rein zu sein. Es muss vielmehr, so oft man einen etwas breiteren Theil des Spectrum untersuchen will, wie z. B. das Ultraviolett, so unrein sein, dass es eine Stelle giebt, wo

---

[1] S. oben S. 15 und 142.

sich sämmtliche ultraviolette Strahlen decken. Um dies nach Belieben zu reguliren, ist es eben vortheilhafter, das Prisma zwischen Linse und Schirm zu stellen. Nähert man den Schirm dem Prisma, und entfernt die Linse um ein entsprechendes Stück, so wird das Spectrum kürzer und unreiner. Entfernt man den Schirm von dem Prisma, so wird es länger und reiner. In dem Schirme *f* befindet sich zwischen GRAVESANDE'schen Schneiden ein feiner Spalt, den man so stellt, dass gerade die Farbe des Spectrum, welche untersucht werden soll, sich auf ihm projicirt. Will man z. B. das Ultraviolett untersuchen, so rückt man den Spalt so, dass er neben dem äussersten Rande des sichtbaren Violett steht. Unter diesen Umständen geht nun regelmässig gebrochenes Ultraviolett, so lichtstark als es eben die Sonne liefert, durch den Spalt, und gleichzeitig etwas weisses von der Substanz des Prisma und der Linse diffus zerstreutes oder an ihren Flächen mehrfach reflectirtes Licht. Das letztere ist allerdings ausserordentlich viel schwächer, als das regelmässig gebrochene Sonnenlicht im Spectrum, aber doch stark genug, um auf dem Schirme *f* das Ultraviolett ganz zu verdecken. Das durch den Spalt *f* gegangene Licht fällt nun auf das zweite Prisma *g* und dahinter entweder unmittelbar oder durch ein Fernrohr in das Auge des Beobachters, wenn man nicht vorzieht, statt des Fernrohrs eine Linse aufzustellen, und in ihrem Brennpunkte auf einem Schirme ein objectives Bild des Spectrum aufzufangen. Da durch den Spalt *f* noch etwas weisses Licht gegangen ist, bekommt man auch hier ein vollständiges Spectrum, aber alle seine Theile sind sehr lichtschwach mit Ausnahme des Ultraviolett, oder welche andere Farbe des im ersten Prisma regelmässig gebrochenen Lichtes man eben durch den Spalt *f* hat gehen lassen. Wenn auch nun im zweiten Prisma *g* und in den Linsen des Fernrohrs *h* oder im Auge des Beobachters *o* Licht unregelmässig zerstreut wird, so ist alles andere Licht ausser dem Ultraviolett jetzt schon zu schwach, als dass die geringen zerstreuten Theile desselben noch sollten wahrgenommen werden können. In der That gelingt es unter diesen Umständen das Spectrum auch im Fernrohr auf ganz tiefschwarzem Grunde projicirt zu sehen, dessen Schwärze nicht mehr zu unterscheiden ist von der der Ocularblendung, so dass sich deren Rand nur da noch abzeichnet, wo er das Spectrum bedeckt. Erst wenn man diese tiefe Schwärze des Grundes erreicht hat, kann man sicher sein, reines einfarbiges Licht vor sich zu haben. Unter diesen Umständen wird denn auch das Ultraviolett des Sonnenlichts dem Auge direct sichtbar, und nur bei solchen Vorsichtsmassregeln gelingt es, die Unveränderlichkeit der Farbe des homogenen Lichts, wenn es durch farbige Gläser hindurchgeht, nachzuweisen. So lange dem Spectrum noch eine kleine Menge diffusen weissen Lichtes beigemischt ist, verändern farbige Medien, welche die betreffende Farbe durch Absorption sehr schwächen, auch scheinbar ihren Farbenton. Ein blaues mit Kobalt gefärbtes Glas zum Beispiel löscht das Gelb des Spectrum fast ganz aus, lässt aber die blauen Strahlen des zerstreuten weissen Lichts ungeschwächt durchgehen, so dass diese, mit dem durch Absorption geschwächten Gelb sich mischend, eine weisse oder selbst blauweisse Mischfarbe an Stelle des Gelb geben, welche Mischfarbe aber nicht, wie D. BREWSTER glaubte, Licht von einem einzigen Grade der Brechbarkeit enthält, sondern deren Licht durch ein zweites Prisma wieder zerlegt werden kann in verschiedenfarbiges und verschieden brechbares Licht. Stellt man denselben Versuch dagegen an einem von diffusem Lichte vollständig befreiten Spectrum an, so bleibt das homogene Gelb auch bei den äussersten Graden der Schwächung durch ein blaues Glas rein gelb. Wir dürfen deshalb auch nicht, wie BREWSTER es gethan hat, aus diesem und ähnlichen Versuchen schliessen, dass das Licht gleicher Brechbarkeit und Wellenlänge noch wieder aus drei verschiedenen Lichtarten von rother, gelber und blauer Farbe zusammengesetzt sei, welche verschiedenfarbigen Lichter nur in verschiedenen Theilen des Spectrum verschieden gemischt seien, und durch die Absorption in farbigen Medien von einander getrennt werden könnten. Die Versuche, auf welche er diese Resultate gründet, beruhen theils auf dem erwähnten Umstande, zum Theil auf Contrastwirkungen, zum Theil auf der schon oben erwähnten Abhängigkeit des Farbentons von der Intensität des Lichts [1].

[1] HELMHOLTZ über D. BREWSTER's neue Analyse des Sonnenspectrum. Pogg. Ann. LXXXVI. 501. — BERNARD Ann. de Chim. XXXV. 385—438.

Nach der beschriebenen und in *Fig. 111* schematisch dargestellten Methode kann man das überviolette Spectrum in ganzer Länge dem Auge direct sichtbar machen, ohne eine fluorescirende Substanz anzuwenden, doch müssen für das äusserste Ultraviolett die Prismen und Linsen alle aus Bergkrystall gefertigt sein, nicht aus Glas, weil letzteres die äussersten ultravioletten Strahlen des Sonnenspectrum merklich absorbirt. Man sieht dann auch sehr deutlich die ausserordentlich grosse Zahl dunkler Linien, welche dieser Theil des Spectrum enthält. Ich glaubte die Helligkeit des im Fernrohre gesehenen ultravioletten Spectrum verstärken zu können, wenn ich in die Ocularblendung eine dünne Schicht Chininlösung zwischen zwei Quarzplatten einschaltete. Dann wird das Spectrum gerade auf die Chininfläche projicirt und erregt deren Fluorescenz. Die fluorescirende Chininfläche wird durch die Ocularlinse betrachtet, und es erscheint nun dem Beobachter ein ähnliches Bild, wie es ohne Chininschicht erscheint, nur ist das Bild dann nicht aus ultraviolettem Lichte, sondern aus weissblauem Lichte mittlerer Brechbarkeit gebildet. Die Helligkeit dieses Bildes war aber in meinem Fernrohr nicht, wie ich erwartet hatte, grösser als die des direct gesehenen ultravioletten Lichts, sondern fast gleich, eher kleiner, und die Linien waren wegen der Dicke der Chininschicht undeutlicher. Der Grund davon ist darin zu suchen, dass durch das Objectivglas des Fernrohrs nur ein schmaler Lichtkegel in das Instrument eindringt, alles oder fast alles Licht dieses Kegels aber auch in das Auge fällt und die Netzhaut beleuchtet, wenn keine Chininschicht eingeschaltet ist. Wenn aber das ultraviolette Licht auf eine Chininlösung fällt, so verbreitet es sich von dieser aus nach allen Richtungen des Raums hin, und nur ein sehr kleiner Theil des vom Chinin ausgehenden Lichts trifft das Auge des Beobachters, daher dessen Netzhaut trotz der grossen Steigerung der Helligkeit des fluorescirenden Lichts nicht stärker beleuchtet wird. Auf diese Erfahrung ist die oben gegebene Angabe über das Verhältniss der Helligkeit des unveränderten ultravioletten Lichts und der dadurch auf Chinin erregten Fluorescenz gegründet.

Ist a die Apertur des Objectivglases oder des davor stehenden Prisma, wenn letzteres die Grundfläche des Lichtkegels begrenzt, und r der Abstand des Bildes, und denkt man sich ferner um den Ort des Bildes als Mittelpunkt eine Kugelfläche vom Radius r geschlagen, so würde das ultraviolette Licht, wenn es sich ungestört fortpflanzte, von der Kugelfläche nur eine Fläche von der Grösse a beleuchten. Wäre das Bild aber auf Chinin gefallen, so würde es die ganze Kugelfläche, deren Grösse $4\pi r^2$ ist, gleichmässig beleuchten. Im ersteren Falle ist das Licht also concentrirter in dem Verhältnisse $\frac{4\pi r^2}{a}$ im Vergleich zum letzteren Falle, und wenn ein Auge, dessen Pupille ganz in das Strahlenbündel beider Lichtarten eingetaucht ist, sie beide gleich hell sieht, so folgt, dass bei gleicher Verbreitungsweise das Fluorescenzlicht im Verhältniss $\frac{4\pi r^2}{a}$ heller sein würde. Letzterer Bruch war bei meinem Apparat, nach Anstellung der nöthigen Correctionen, gleich 1200. Daraus folgt also, dass das ultraviolette Licht auf einem Chininschirme aufgefangen etwa 1200 Mal heller erscheinen muss, als wenn es auf einer nicht fluorescirenden matten weissen Fläche von Porzellan aufgefangen wird.

Die Fluorescenz der stark fluorescirenden Substanzen kann man in jedem Spectrum leicht beobachten und erkennen. Handelt es sich aber darum, die schwächsten Grade der Fluorescenz wahrzunehmen, wie z. B. die der Netzhaut, so kann man den in *Fig. 111* dargestellten Apparat mit folgenden Abänderungen benutzen. Man macht das erste Spectrum sehr unrein, indem man den ersten Spalt bei c ganz wegnimmt und das Prisma e nahe an den Schirm f heranrückt; dabei lässt man die Grenze des Violett auf dem Schirme f gerade dessen weit geöffneten Spalt berühren. Von dem Fernrohr h lässt man nur die Objectivlinse stehen, und bringt dann in deren Brennpunkt, wo das ultraviolette Licht am meisten concentrirt und von allem weissen Lichte gereinigt ist, die fraglichen Substanzen. Es giebt kaum irgend welche Stoffe, an denen man unter solchen Umständen nicht Spuren von Fluorescenz wahrnähme. Da bei diesen Versuchen auch das unveränderte ultraviolette Licht noch sichtbar sein kann, so blickt man nach der untersuchten Substanz entweder durch ein gelbes oder grünes Glas (am besten

Uranglas), welches das Ultraviolett auslöscht, oder durch ein schwach brechendes Prisma, welches das Ultraviolett von den Farben mittlerer Brechbarkeit trennt. Die Fluorescenz der Linse und der Hornhaut des Auges ist leicht nachzuweisen, wenn man ein lebendes Auge in den Focus ultravioletten Lichts bringt. Die Linse wird so stark beleuchtet, dass man noch viel besser als bei der Beleuchtung mit gewöhnlichem Licht (S. 15) ihre Lage dicht hinter der Iris und ihre Form erkennen kann. Die fluorescirende Linse zerstreut natürlich eine grosse Menge blauweissen Lichts gleichmässig über den ganzen Hintergrund des Auges. Wenn man dagegen ein ultraviolettes Spectrum betrachtet, sieht man dies sehr scharf und fein gezeichnet. Daher darf man nicht daran denken, dass das überviolette Licht dem Auge etwa wegen der Fluorescenz der Linse sichtbar würde. Letztere könnte nie ein scharf begrenztes Netzhautbild geben.

In derselben Weise wie das Ultraviolett untersucht man das äusserste Roth.

Die Methoden der Wellenmessungen gehören in die physikalische Optik, auf welche ich in dieser Beziehung verweisen muss.

Vor Newton's Zeit bestand die Farbentheorie meist aus unbestimmten Hypothesen. Da das aus dem gesammten weissen Lichte ausgeschiedene farbige Licht als Theil nothwendig immer geringere Intensität hat als das Ganze, so betrachtete man in älterer Zeit diese Verminderung der Lichtintensität als das Wesentliche der Farbe, und die Meinung des Aristoteles, Farbe entstehe durch eine Mischung von Weiss und Schwarz, zählte viele Anhänger. Er selbst ist unschlüssig, ob er diese Vermischung als eine wahre Verschmelzung oder mehr als ein atomistisches Ueber- oder Nebeneinanderliegen denken soll. Das Dunkle, meint er, müsse durch die Reflexion an den Körpern entstehen, da jede Reflexion das Licht schwäche. Es ist dies die durchgängige Ansicht bis zum Anfange der neueren Zeit z. B. bei Maurolycus, Joh. Fleischer, de Dominis, Funk, Nuguet (siehe Goethe's Geschichte der Farbenlehre), und in neuester Zeit hat Goethe sie noch einmal in seiner Farbenlehre zu vertheidigen gesucht. Dieser geht eigentlich nicht darauf aus, eine Erklärung der Farbenerscheinungen im physikalischen Sinne zu geben — als solche genommen, würden seine Sätze sinnlos sein —, sondern er sucht nur die Bedingungen allgemein aufzustellen, unter denen Farben entstehen; diese sollen sich in einem „Urphänomen“ deutlich darlegen. Als solches betrachtet er die Farben trüber Medien. Eine grosse Zahl solcher Medien machen durchgehendes Licht roth, auffallendes lässt sie vor dunklem Hintergrunde blau erscheinen. Während nun Goethe im Allgemeinen der Ansicht des Aristoteles folgt, dass das Licht verdunkelt, oder mit Dunkel gemischt werden müsse, um Farben zu erzeugen, glaubt er in den Erscheinungen der trüben Medien die besondere Art der Verdunkelung gefunden zu haben, welche nicht Grau, sondern Farben erzeuge. Was dadurch am Lichte selbst geändert werde, erklärt er nie. Er spricht wohl davon, dass das trübe Medium dem Lichte etwas Körperliches, Schattiges gebe, wie es zur Erzeugung der Farbe nöthig sei. Wie er sich dies denkt, deutet er nicht näher an. Unmöglich kann er meinen, dass von den Körpern etwas Körperliches mit dem Lichte davonfliege; und einen anderen Sinn könnte es doch kaum haben, wenn es eine physikalische Erklärung sein sollte.

Goethe betrachtet ferner alle durchsichtigen Körper als schwach trübe, so auch das Prisma, und nimmt an, dass das Prisma dem Bilde, welches es dem Beobachter zeigt, von seiner Trübung etwas mittheile. Er scheint dabei gemeint zu haben, dass das Prisma nie ganz scharfe Bilder entwirft, sondern undeutliche, verwaschene, denn er reiht sie in der Farbenlehre an die Nebenbilder an, welche parallele Glasplatten und Krystalle von Kalkspath zeigen. Verwaschen sind die Bilder des Prisma allerdings im zusammengesetzten Lichte, vollkommen scharf im einfachen, welches Goethe, wie es scheint, aber nie vor sich gehabt hat, da er die zusammengesetzten Methoden, welche es liefern können, einzuschlagen verschmähte. Betrachte man, meint er, durch das Prima eine helle Fläche auf dunklem Grunde, so werde das Bild vom Prisma verschoben und getrübt. Der vorangehende Rand desselben werde über den dunklen Grund hinübergeschoben, und erscheine als helles Trübes vor Dunklem blau. Der hinterher folgende Rand der hellen Fläche werde aber von dem vorgeschobenen trüben Bilde des darnach folgenden schwarzen Grundes überdeckt und erscheine als ein Helles hinter einem dunkeln Trüben gelbroth. Warum der vorangehende Rand vor dem Grunde, der nachbleibende hinter demselben erscheine, und nicht umgekehrt, erklärt er nicht. Auch diese Darstellung der Sache, wenn man sie als physikalische Erklärung fassen wollte, wäre sinnlos. Denn das prismatische Bild, welches in diesen Fällen gesehen wird, ist ein potentielles, also nur der geometrische Ort, in welchem rückwärts verlängert, sich die Lichtstrahlen, welche in das Auge des Beobachters fallen, schneiden würden, und kann also nicht die physikalischen Wirkungen eines trüben Mittels ausüben. Es sind diese Goethe'-

schen Darstellungen eben nicht als physikalische Erklärungen, sondern nur als bildliche Versinnlichungen des Vorgangs aufzufassen. Er geht überhaupt in seinen naturwissenschaftlichen Arbeiten darauf aus, das Gebiet der sinnlichen Anschauung nicht zu verlassen, jede physikalische Erklärung muss aber zu den Kräften aufsteigen, und die können natürlich nie Object der sinnlichen Anschauung werden, sondern nur Objecte des begreifenden Verstandes.

Die Versuche, welche Goethe in seiner Farbenlehre angiebt, sind genau beobachtet und lebhaft beschrieben, über ihre Richtigkeit ist kein Streit. Die entscheidenden Versuche mit möglichst gereinigtem einfachen Lichte, auf welche Newton's Theorie gegründet ist, scheint er nie nachgemacht oder gesehen zu haben. Seine übermässig heftige Polemik gegen Newton gründet sich mehr darauf, dass dessen Fundamentalhypothesen ihm absurd erscheinen, als dass er etwas Erhebliches gegen seine Versuche oder Schlussfolgerungen einzuwenden hätte. Der Grund aber, weshalb ihm Newton's Annahme, das weisse Licht sei aus vielfarbigem zusammengesetzt, so absurd erschien, liegt wieder in seinem künstlerischen Standpunkte, der ihn nöthigte, alle Schönheit und Wahrheit unmittelbar in der sinnlichen Anschauung ausgedrückt zu suchen. Die Physiologie der Sinnesempfindungen war damals noch unentwickelt, die Zusammensetzung des Weiss, welche Newton behauptete, war der erste entschiedene empirische Schritt zu der Erkenntniss der nur subjectiven Bedeutung der Sinnesempfindungen. Und Goethe hatte daher ein richtiges Vorgefühl, wenn er diesem ersten Schritte heftig opponirte, welcher den „schönen Schein" der Sinnesempfindungen zu zerstören drohte.

Das grosse Aufsehen, welches Goethe's Farbenlehre in Deutschland machte, beruhte zum Theil darauf, dass das grosse Publicum, ungeübt in der Strenge wissenschaftlicher Untersuchungen, natürlich mehr geneigt war, einer künstlerisch anschaulichen Darstellung des Gegenstandes zu folgen, als mathematisch physikalischen Abstractionen. Dann bemächtigte sich auch die Hegel'sche Naturphilosophie der Goethe'schen Farbenlehre für ihre Zwecke. Hegel wollte ähnlich wie Goethe in den Naturerscheinungen den unmittelbaren Ausdruck gewisser Ideen oder gewisser Stufen des dialectisch sich entwickelnden Denkens sehen, darin liegt seine Verwandtschaft mit Goethe und sein principieller Gegensatz gegen die theoretische Physik.

Descartes machte bei Gelegenheit seiner Untersuchungen über die Theorie des Regenbogens eine neue Hypothese, indem er annahm, die Theilchen, aus denen das Licht bestehe, hätten nicht blos eine geradlinige Bewegung, sondern rotirten auch noch um ihre Axe und von der Rotationsgeschwindigkeit hänge die Farbe ab. Die Rotation und somit auch die Farbe könne übrigens geändert werden durch Einwirkung durchsichtiger Körper. Aehnliche mechanische Vorstellungen bildeten sich Hooke und de la Hire; letzterer liess die Farben von der Stärke abhängen, mit der das Licht auf den Sehnerven trifft.

Endlich bewies Newton die Zusammensetzung des weissen Lichts, und schied einfaches Licht aus, zeigte, dass dies farbig erscheine, dass dessen Farbe durch Absorption und Brechung nicht weiter verändert werden könne, dass verschiedenfarbiges Licht verschiedene Brechbarkeit besitze, und dass die Farben der natürlichen Körper durch verschiedene Absorption und Reflexion der verschiedenartigen Lichtstrahlen entständen. Uebrigens erklärt er die Farbe der Lichtstrahlen schon durchaus aus ihrer Wirkung auf die Netzhaut; nicht die Lichtstrahlen selbst seien roth, sondern sie bewirkten die Empfindung des Roth. Er folgte der Emanationstheorie des Lichtes; Hypothesen über den physikalischen Unterschied der verschiedenfarbigen Lichtarten machte er nicht.

Ziemlich gleichzeitig, 1690, hatte Huyghens die Hypothese aufgestellt, dass das Licht in Undulationen eines feinen elastischen Medium bestehe; diese Hypothese brachte Euler mit Newton's Entdeckungen in Verbindung, und folgerte daraus, dass die einfachen Farben sich durch ihre Schwingungsdauer unterschieden; aber freilich nahm er zuerst an, die rothen machten die schnelleren Schwingungen, und fand erst später das Richtige; Hartley stützte diese Ansicht richtig auf die Farben dünner Blättchen. Eine bestimmte Entscheidung darüber wurde erst möglich, als Th. Young und Fresnel das Princip der Interferenz entdeckt hatten, und durch diese Entdeckung gewann auch erst die Undulationstheorie eine allgemeine Anerkennung.

Gegen Newton's Folgerung, dass die Farbe der Strahlen von der Brechbarkeit abhänge, Strahlen von einem constanten Grade der Brechbarkeit übrigens homogen und von unveränderlicher Farbe seien, trat D. Brewster auf. Er meinte beobachtet zu haben, dass homogenes Licht, wenn es durch farbige Mittel gehe, seine Farbe ändern könne, und meinte auf diese Weise aus homogenem Lichte Weiss ausscheiden zu können. Er schloss daraus, dass es dreierlei verschiedene Arten Licht, den drei sogenannten Grundfarben entsprechend, gebe, rothes, gelbes und blaues, und dass jede dieser Lichtarten Strahlen von jedem Grade der Brechbarkeit innerhalb der Grenzen des Spectrum liefere, aber so, dass das rothe Licht am rothen Ende, das Gelb in der Mitte, das Blau am blauen Ende überwiege. Farbige Mittel sollten die verschiedenfarbigen Lichter gleicher Brechbarkeit in verschiedener Stärke ab-

sorbiren und dadurch von einander trennen können. Gegen BREWSTER opponirten AIRY, DRAPER, MELLONI, HELMHOLTZ, F. BERNARD. Ausser einigen Fällen, wo durch Contrastwirkungen der nebenstehenden lebhafteren Farben der Farbenton der durch farbige Gläser sehr geschwächten Strahlen verändert erschien, und einigen Fällen, wo die oben erwähnte Aenderung der Farbe mit der Lichtstärke in Betracht kam, rühren die meisten von BREWSTER geltend gemachten Beobachtungen von dem oben schon erwähnten Umstande her, dass kleine Mengen weissen Lichts durch mehrfache Reflexion an den Oberflächen oder durch diffuse Reflexion in der Substanz der Prismen und der Augenmedien über das Gesichtsfeld zerstreut waren.

Die Vergleichung der einfachen Farben mit den Tönen wurde von NEWTON zuerst angestellt; er verglich aber nur die Breite der Farbenstreifen im Spectrum von Glasprismen mit den musikalischen Intervallen der phrygischen Tonleiter. Schon LAMBERT bemerkte, dass in dieser Abtheilung viel Willkührliches wäre, da keine festen Grenzen im Spectrum beständen. Nur soviel sei richtig, dass die Farbenstreifen vom Roth gegen das Violett dergestalt in der Breite anwachsen, dass man nicht sowohl die Summe ihrer Breiten, als die Summe ihrer Verhältnisse zum Maasse derselben nehmen muss, so wie es in der Musik mit den Tönen geschieht. Aehnlich urtheilte DE MAIRAN. Indessen suchte doch Pater CASTEL auf diese Vergleichung ein Farbenclavier zu gründen, welches durch eine gewisse Farbenfolge ähnliche Wirkungen, wie die Musik, hervorbringen sollte. HARTLEY, welcher die Unterschiede der Farben auf Schwingungen verschiedener Länge zurückzuführen suchte, gewann dadurch die Möglichkeit einer directeren Vergleichung mit den Schwingungszahlen der Töne. In demselben Sinne bemerkte auch TH. YOUNG, dass der ganze Umfang des damals bekannten Theils des Spectrum einer grossen Sexte gleich kommt, dass Roth, Gelb, Blau etwa den Verhältnissen 8:7:6 entsprechen. Nachdem nun in neuerer Zeit die Grösse der Wellenlängen für die verschiedenen Farben namentlich durch FRAUNHOFER's Messungen genauer bekannt geworden ist, hat DROBISCH wieder versucht, die Vergleichung der Farbenscala mit der Tonscala herzustellen. Er vergleicht wie NEWTON die Breite der Farben mit den Intervallen der sogenannten phrygischen Tonart $1 : \frac{9}{8} : \frac{6}{5} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{16}{9} : 2$. Da aber das Verhältniss der Wellenlängen für die Grenzen des gewöhnlich sichtbaren Spectrum, wie es FRAUNHOFER ausgemessen hat, kleiner ist als eine Octave, so erhebt er alle jene Verhältnisszahlen in eine Potenz, als deren Exponent er erst $\frac{2}{3}$, später $\frac{6}{7}$ wählte. Dadurch erhält er folgende Tafel, in der die Wellenlängen in Milliontheilen eines Millimeters ausgedrückt sind:

Farbe	Grenzen	Linien
Roth	688,1 – 622,0	Linie $B = 687{,}8$; $C = 655{,}6$
Orange	622,0 – 588,6	$D = 588{,}8$
Gelb	588,6 – 537,7	
Grün	537,7 – 486,1	$E = 526{,}5$
Blau	486,1 – 446,2	$F = 485{,}6$
Indigo	446,2 – 420,1	$G = 429{,}6$
Violett	420,1 – 379,8	$H = 396{,}3$.

Die Grenzen der Farben unter sich stimmen in diesem Schema ziemlich gut mit den natürlichen überein; zweckmässig möchte es vielleicht sein, statt der kleinen Terz die grosse zu nehmen, also die ganze Vergleichung auf die Durtonleiter zu bauen, wie DROBISCH auch selbst bemerkt; dann fiele die Grenze des Orange und Gelb, die im obigen Schema im Goldgelb bei *D* liegt, dem reinen Gelb näher. Aber wenn auch in sofern die Vergleichung stimmt, so vergesse man nicht, dass der ganze Sinn der Vergleichung zwischen Schall- und Lichtwellen schon durch die Erhebung der musikalischen Verhältnisse in eine gebrochene Potenz verloren gegangen ist, dass die Enden des Spectrum willkührlich abgebrochen sind, da in der That die schwach wirkenden Endfarben des Spectrum an beiden Seiten viel weiter reichen, dass die NEWTON'sche Abtheilung der 7 Hauptfarben schon willkührlich gemacht und nur der musikalischen Analogien wegen so gewählt ist. Goldgelb verdiente mindestens ebenso gut seinen Platz zwischen Gelb und Orange, wie Indigo zwischen Blau und Violett, ebenso

Gelbgrün und Blaugrün, und dass endlich Grenzen der Farben im Spectrum wirklich nicht existiren, sondern von uns nur der Nomenclatur zu Liebe willkührlich gezogen werden. Ich selbst glaube deshalb, dass man diese Vergleichung aufgeben müsse.

Endlich hat in neuester Zeit auch Unger versucht, auf die Vergleichung der Lichtwellenverhältnisse mit den musikalischen Intervallen eine Theorie der ästhetischen Farbenharmonie zu gründen. In seinen factischen Angaben über die harmonirenden Farben scheint viel Wahres zu sein, was grossentheils aus Kunstwerken richtig abstrahirt ist, aber seine Theorie, die Vergleichung mit den musikalischen Verhältnissen, ist etwas gewaltsam erzwungen. Auf seiner chromharmonischen Scheibe hat er Farbentöne zusammengestellt, die den 12 halben Tönen der Octave entsprechen sollen, zu welchem Zweck er aber zwischen Violett und Roth purpurrothe Farben einschaltet, die als einfache Farben nicht existiren. In diese purpurnen Töne lässt er die Fraunhofer'schen Linien *G*, *H*, *A* fallen, während die beiden ersteren das reine Violett begrenzen, die letztere dem reinen Roth angehört. Die einfachen Farben, welche über das Violett hinausliegen, sind in Wahrheit blau, nicht purpurroth. Die vollkommenste Harmonie soll dem Duraccord entsprechen. Dieser liefert auf seiner Scheibe z. B. die viel gesehene Zusammenstellung der italienischen Maler: Roth, Grün, Violett. Aber der richtige Duraccord, wenn man Grün als grosse Terz nimmt, wäre Roth, Grün, Indigblau. Den antiken Malern fehlt ein gutes Roth, sie brauchen Mennige, Orange, dafür und bilden den Accord: Orange, Grünblau, röthlich Violett. Die Mollaccorde geben einen sanfteren und trüberen Eindruck, die verminderten und übermässigen Dreiklänge geben einen pikanten, weniger künstlerisch reinen Eindruck. Ich glaube, dass man für die richtigen Beobachtungen der Farbenwirkung, die sich bei Unger finden, statt der erzwungenen musikalischen Analogien einen anderen Grund suchen muss. Die gesättigten Farben bilden in der That eine in sich zurücklaufende Reihe, wenn wir die Lücke zwischen den Enden des Spectrum durch die purpurnen Töne ergänzen, und dem Auge scheint es angenehm zu sein, wenn ihm drei Farben geboten werden, die ungefähr gleichweit in der Reihe auseinanderliegen. Die oben erwähnte berühmte Zusammenstellung der italienischen Maler: Roth, Grün, Violett, welche keinem richtigen Duraccorde entspricht, entspricht in Wirklichkeit den drei Grundfarben von Th. Young, und darin kann der Grund ihrer ästhetischen Wirkung liegen. Andere Farben, in richtiger Distanz von einander gewählt, machen einen ähnlichen befriedigenden Eindruck. Wo zwei derselben sich zu sehr nähern, wird der Eindruck minder rein. Das ist vielleicht die Bedeutung von Unger's Beobachtungen; übrigens kann offenbar bei der sogenannten Farbenharmonie von einer so strengen Bestimmung wie bei den musikalischen Intervallen nicht die Rede sein.

384—322. v. Ch. Aristoteles de coloribus.

1571. Joh. Fleischer de iridibus doctrina Aristotelis et Vitellionis. Vitembergae 1571. p. 86.

1583. Jo. Bapt. Porta de refractione libri novem. Neapoli 1583. lib. IX.

1590. Bernardini Telesii opera. Venetiis 1590. De Iride et coloribus.

1611. M. Antonii de Dominis de radiis visus et lucis in vitris perspectivis et Iride. Venetiis 1611.

1613. Maurolycus de lumine et umbra. Lugd. 1613. p. 57.

1637. Cartesius de meteoris. Cap. VIII.

1648. Jo. Marcus Marci Thaumantias, liber de arcu coelesti, deque colorum apparentium natura, ortu et caussis. Pragae 1648.

1665. R. Hooke. Micrographia. London 1665. p. 64.

1675. *I. Newton in *Philosophical Transact.* 1675. (Erste Notizen über seine Ansicht) — Optics. London 1704. (Vollständige Ausarbeitung seiner optischen Entdeckungen) — Lectiones opticae.

1711. De la Hire. *Mém. de l'Acad. des Sc.* 1711. p. 100.

1746. Euler. Nova theoria lucis colorum in den *Opusculis varii argumenti.* Berol. 1746. p. 169—244.

1752. Euler in *Mém. de l'Acad. de Prusse 1752.* p. 271. *Essai d'une explication des couleurs.*

Gegen Newton.

1727. Rizetti. Specimen physico math. de luminis affectionibus. Ven. 1727.

1737. Leblond. *Harmony of colouring.* London.

1740. Castel. *L'optique des couleurs.* Paris.

1750. Gautier. *Chroagenesie ou génération des couleurs contre le système de Newton.* Paris. 2 vol. 8.

1752. Gautier. *Observations sur l'histoire naturelle, sur la physique et la peinture.* Paris.

1754. Cominale. Anti-Newtonianismus. 4. Napoli.
1780. Marat. *Découvertes sur la lumière.* Paris. 8.
1784. Marat. *Notions élémentaires d'optique.* Paris. 8.
1791. 92. Goethe. Beiträge zur Optik. Weimar.
1794. Wünsch. Kosmologische Unterhaltungen.
1810. Goethe. Zur Farbenlehre. Entoptische Farben, zur Naturwissenschaft 126—190.
1823. Bourgeois. *Manuel d'optique expérimentale.* Paris. 2 vol. 12.

Ueber Newton und Goethe.

1811. Seebeck. Von den Farben und dem Verhalten derselben gegen einander. Schweigger's Journal 1811. p. 1.
Mollweide. Demonstratio propositionis quae theoriae colorum Newtoni fundamenti loco est. Lipsiae 1811.
Pfaff. Ueber die farbigen Säume der Nebenbilder des Doppelspaths mit besonderer Berücksichtigung von Goethe's Erklärung der Farbenentstehung durch Nebenbilder. Schweigger's Jahrbücher VI. 177.
Poselger in Gilbert's Annalen XXXVII. 135.
1817. Werneburg. Merkwürdige Phänomene durch verschiedene Prismen zur richtigen Würdigung Newton'scher und Goethe'scher Farbenlehre. Nürnberg 1817. 4.
1827. Brandes' Art. Farbe in Gehler's neuem physik. Wörterbuch.
1833. Reuther. Ueber Licht und Farbe. Kassel 1833.
Steffens. Ueber die Bedeutung der Farben in der Natur. Schriften alt und neu.
1835. Helwag. Newton's Farbenlehre aus ihren richtigen Principien berichtigt. Lübeck 1835.
Moser. Ueber Goethe's Farbenlehre. Abh. der Königsberger deutschen Gesellsch.
1853. Helmholtz. Ueber Goethe's naturwissenschaftliche Arbeiten in Kieler Monatsschrift für Wissenschaft und Lit. 1853. Mai S. 383.
1857. Grävell. Goethe im Recht gegen Newton. Berlin 1857. — Recensirt von O. Icilius in Kekule's kritischer Zeitschr. für Chemie, Physik und Math. Erlangen 1858. 2. und 3. Heft.
1859. Grävell. Ueber Licht und Farben. Berlin (Antwort auf die Recension).

Eigenthümliche Theorien.

1816. Reade. *Experimental outlines for a new theory of colours, light and vision.* London. 8.
1824. Hoppe. Versuch einer ganz neuen Theorie der Entstehung sämmtlicher Farben. Breslau. 8.
1828. Röttger. Erklärung des Lichts und der Dunkelheit. Halle.
1830. Schäffer. Versuch einer Beantwortung der von der Akad. zu Petersburg aufgegebenen Preisfrage über das Licht. Bremen. 8.
Walter Crumm. *An experimental inquiry into the number and properties of the primary colours, and the source of colours in the prism.* London 1830.
1831. D. Brewster. *Description of a monochromatic Lamp with Remarks on the absorption of the Prismatic Rays. Edinb. Transact.* IX. P. II. p. 433.
Derselbe. *On a new Analysis of Solar Light. Edinb. Transact.* XII. P. I. 123. Pogg. Ann. XXIII. 435.
1834. Exley. *Physical optics or the phenomena of optics.* London.

Ueber Brewster's Theorie.

1847. Airy in *Philos. Magaz.* (3.) XXX. 73. Pogg. Ann. LXXI. 393.
Brewster *Reply.* ibid. XXX. 153.
Draper in Silliman Journ. IV. 388. *Phil. Magaz.* XXX. 345.
Brewster. *Phil. Magaz.* XXX. 461.
Melloni. *Bibl. univ. de Genève.* Août 1847. *Phil. Magaz.* XXXII. 262. Pogg. Ann. LXXV. 62.
Brewster. *Phil. Magaz.* XXXII. 489.
1852. Helmholtz. Ueber Herr D. Brewster's neue Analyse des Sonnenlichts. Pogg. Ann. LXXXVI. 501. — *Phil. Magaz.* (4.) IV.
F. Bernard. *Thèse sur l'absorption de la lumière par les milieux non crystallisés. Ann. de Chim.* (3.) XXXV. 385—438.
1855. D. Brewster. *On the triple spectrum.* Athen. 1855, p. 1156. Inst. 1855, p. 381. *Report of Brit. Assoc.* 1855. 2. p. 7—9.

Grenzen der Empfindlichkeit.

1845. 46. Brücke in Müller's Archiv für Anat. und Physiol. 1845. S. 262. 1846. S. 379. Pogg. Ann. LXV. 593. LXIX. 549.
1852. Cima. *Sul potere degli umori dell' occhio a trasmettere il calorico raggiante.* Torino.
1853. Donders. In Onderzoekingen gedaan in het physiol. Laborat. van de Utrechtsche Hoogeschool. Jaar. VI. p. 1. Müller's Archiv 1853. S. 459.
1854. G. Kessler in Graefe Archiv für Ophthalmologie I. Abth. 1. S. 466.
1855. Helmholtz. Ueber die Empfindlichkeit der menschlichen Netzhaut für die brechbarsten Strahlen des Sonnenlichts. Pogg. Ann. XCIV. 205. *Ann. de Chim.* (3.) XLIV. 74. *Arch. d. sc. phys.* XXIX. 243.

Vergleichung mit den Tonintervallen.

1704. I. Newton. Optics. Lib. I. Pars 2. Prop. 3.
1725—35. L. B. Castel. *Clavecin oculaire* in *Journ. de Trevoux.*
1737. de Mairan in *Mém. de l'Acad. des Sc.* 1737. p. 61.
1772. Lambert. Farbenpyramide. Augsburg 1772. §. 19.
1772. Hartley in Priestley Geschichte der Optik. S. 549.
1802. Th. Young in *Phil. Transact.* 1802. p. 38.
1852. Drobisch. Abhandl. d. sächsischen Gesellsch. der Wiss. Bd. II. Sitzungsberichte derselben. Novbr. 1852. Pogg. Ann. LXXXVIII. 519—526.
Unger in Pogg. Ann. LXXXVII. 121—128. C. R. XL. 239.
1854. Derselbe. *Disque chromharmonique.* Göttingue.
1855. Helmholtz in Sitzbr. d. Akad d. Wiss. zu Berlin 1855. S. 760. Inst. 1856 p. 222.
J. J. Oppel. Ueber das optische Analogon der musikalischen Tonarten. Jahresber. der Frankfurter Vers. 1854—55. p. 47—55.
E. Chevreul. *Remarques sur les harmonies des couleurs* C. R. XL. 239—242; *Edinb. Journ.* (2.) I. 166—168.

§. 20. Die zusammengesetzten Farben.

Wir haben gesehen, dass homogenes Licht von verschiedener Brechbarkeit und Schwingungsdauer die Empfindung verschiedener Farben in unserem Sehnervenapparate hervorbringt. Wenn nun ein und dieselbe Stelle der Netzhaut gleichzeitig von Licht zweier oder mehrerer verschiedener Grade der Schwingungsdauer getroffen wird, so entstehen neue Arten von Farbenempfindungen, welche im Allgemeinen von denen der einfachen Farben des Spectrum verschieden sind, und welche das Eigenthümliche haben, dass aus der Empfindung der zusammengesetzten Farbe nicht erkannt werden kann, welche einfache Farben in ihr enthalten sind. Es lässt sich vielmehr im Allgemeinen die Empfindung jeder beliebigen zusammengesetzten Farbe durch mehrere Arten der Zusammensetzung verschiedener Spectralfarben hervorbringen, ohne dass es auch dem geübtesten Sinnesorgane möglich wäre, ohne Hülfe physikalischer Instrumente zu ermitteln, welche einfache Farben in dem zusammengesetzten Lichte verborgen sind. Es unterscheidet sich dadurch das Auge in seiner Reaction gegen die Aetherschwingungen wesentlich vom Ohre, welches, von Tonwellen verschiedener Schwingungsdauer getroffen, die einzelnen Töne zwar zu einer Gesammtempfindung eines Accords verbindet, aber doch jeden einzelnen einzeln darin wahrnehmen kann, so dass zwei aus verschiedenen Tönen zusammengesetzte Accorde dem Ohre niemals identisch erscheinen, wie es für das Auge verschiedene Aggregate zusammengesetzter Farben sein können.

Was hier gesagt ist, bezieht sich auf die unmittelbare Sinnesempfindung, und wird keineswegs umgestossen durch die Erfahrung, das uns ein Act des Urtheils zuweilen die Zusammensetzung wenigstens der Hauptsache nach richtig erkennen lässt. Wer einige Erfahrung über die Resultate der Mischung farbigen Lichtes hat,

glaubt zuweilen in einer Mischfarbe die einfachen Farben, welche sie zusammensetzen, wirklich zu sehen, giebt an, ob mehr von der einen oder anderen darin sei. Indessen wird dann ein Act des auf Erfahrung gegründeten Urtheils mit einem Acte der Empfindung verwechselt. Wenn man z. B. Purpur betrachtet, so kann man wissen, dass es überwiegend aus Roth und Violett zusammengesetzt sei, und in welchem Verhältnisse beide ungefähr gemischt sind. Aber man kann nicht wissen, ob in der Farbe noch untergeordnete Mengen von Orange oder Blau enthalten sind. Wäre es die Empfindung und nicht blos das auf Erfahrung gestützte Urtheil, so müsste man das letztere ebenso gut ermitteln können, als das erstere. Beim Weiss, welches die grösste Mannigfaltigkeit der Zusammensetzung zulässt, wird es Niemandem einfallen, heraussehen zu wollen, welche einfache Farben darin enthalten sind, ob zwei, oder drei, oder vier, und welche besonderen. Wie leicht aber Täuschung hier möglich ist, zeigt das Grün, in welchem, getäuscht durch die Mischung der Malerfarben, sowohl das Gelb als das Blau zu sehen, Männer wie Goethe und Brewster behauptet haben, während jetzt nachgewiesen werden kann, dass Grün aus jenen Farben gar nicht zusammengesetzt werden kann, wenn man nicht Modificationen derselben nimmt, die selbst schon grünlich sind.

Am auffallendsten wird die Täuschung, als könnte man zwei einfache Farben gleichzeitig an demselben Orte sehen, wenn eine Fläche gleichzeitig von zwei verschiedenen Farben erleuchtet wird, aber so dass an einzelnen Stellen die eine, an anderen Stellen die andere überwiegt, namentlich wenn die eine den Grund füllt, die andere darauf eine regelmässige Zeichnung bildet. Besonders günstig ist es auch, wenn die Zeichnung oder die Flecken ihren Ort wechseln. Dann glauben wir oft die beiden Farben gleichzeitig, die eine gleichsam durch die andere hindurch an demselben Orte zu sehen. Wir verfahren in solchen Fällen ebenso, als sähen wir Objecte durch einen farbigen Schleier, oder von einer farbigen Fläche gespiegelt. Wir haben durch Erfahrung gelernt, uns auch unter solchen Umständen ein richtiges Urtheil über die wahre Farbe des Objects zu bilden, und dieselbe Scheidung zwischen der Farbe des Grundes und des darauf unregelmässig verbreiteten Lichts nehmen wir dann auch in allen ähnlichen Fällen im Urtheile vor. Will man die Empfindung der Mischfarben ungestört haben, so muss eben das gemischte Licht in dem ganzen Felde, wo es verbreitet ist, gleichmässig gemischt sein.

In einzelnen Fällen, namentlich wenn zwei Farben, die im Spectrum weit auseinander liegen, ein scharf begrenztes Feld füllen, erkennen wir die Farben an den Rändern mittels der Farbenzerstreuung im Auge [1] von einander gesondert. Auch das giebt natürlich keinen brauchbaren Einwurf gegen den aufgestellten Satz, da in diesem Falle das Auge selbst wie ein Prisma wirkt, und bewirkt, dass verschiedene Theile der Netzhaut von dem verschiedenfarbigen Lichte getroffen werden.

Die Methoden um verschiedenfarbiges Licht zusammenzusetzen, und die Wirkung des zusammengesetzten Lichts auf das Auge zu prüfen, sind die folgenden:

[1] S. oben S. 127.

1) Man bringt verschiedene Spectra oder verschiedene Theile desselben Spectrum zum Decken. So erhält man die Zusammensetzungen je zweier einfacher Farben.

2) Man blickt durch eine ebene Glastafel in schräger Richtung nach einer farbigen Fläche, während die dem Beobachter zugekehrte Seite der Glastafel ihm gleichzeitig Licht eines andersfarbigen Objects durch Reflexion zusendet. So gelangt in das Auge des Beobachters gleichzeitig von der Glastafel durchgelassenes Licht der einen und reflectirtes Licht der anderen Farbe, und beide treffen dieselben Theile der Netzhaut. Auf diese Weise kann man namentlich bequem die zusammengesetzten Farben der Naturkörper weiter zusammensetzen.

3) Man lässt auf dem Farbenkreisel Scheiben schnell rotiren, auf denen verschiedenfarbige Sectoren angebracht sind. Ist die Rotation schnell genug, so verbinden sich die Eindrücke, welche die verschiedenen Farben auf der Netzhaut machen, zur Empfindung einer einzigen Farbe, der Mischfarbe.

Alle drei Methoden geben in Rücksicht der Farbenmischung gleiche Resultate, ihre Ausführung wird unten specieller beschrieben werden. Nicht angewendet werden darf die Methode der Mischung pulveriger oder flüssiger Pigmente, welche von Newton und vielen anderen Physikern als gleichgeltend mit der ersten Methode, der Mischung von Spectralfarben, betrachtet worden ist. Denn der gemischte Farbstoff giebt keineswegs ein Licht, welches die Summe der von den einzelnen, in der Mischung enthaltenen Farbstoffen reflectirten Lichter wäre.

Nehmen wir, um dies deutlich zu machen, zunächst farbige Flüssigkeiten. Das Licht, welches durch sie hindurchgeht, wird durch Absorption gefärbt, d. h. es werden von den verschiedenfarbigen Strahlen des weissen Lichts einige, schon nachdem sie eine kurze Strecke in der Flüssigkeit zurückgelegt haben, so geschwächt, dass sie verschwinden, während andere längere Strecken der Flüssigkeit durchlaufen können, ohne merklich geschwächt zu werden. In dem ausgetretenen Lichte überwiegen die letzteren, und dieses Licht hat also die Farbe derjenigen Strahlen, welche am wenigsten von der Flüssigkeit absorbirt werden. Diese Absorption einzelner Farben des Spectrum kann man nachweisen, wenn man solches Licht, welches durch eine farbige Flüssigkeit (oder farbiges Glas) gegangen ist, nachher ein Prisma passiren lässt, und ein Spectrum bildet. In dem Spectrum fehlt dann eine Reihe von Farben, oder ist sehr schwach, während die Theile des Spectrum, deren Farbe der Flüssigkeit entspricht, die gewöhnliche Helligkeit haben.

Mischt man nun zwei farbige Flüssigkeiten miteinander, welche sich gegenseitig chemisch nicht verändern, so dass die Absorptionskraft jeder einzelnen für die verschiedenfarbigen Lichtstrahlen unverändert bleibt, so gehen nur solche Strahlen durch die Mischung, welche von keiner der beiden Flüssigkeiten absorbirt werden. Das sind gewöhnlich die Strahlen, welche in der prismatischen Reihe in der Mitte liegen zwischen den Farben der beiden gemischten Flüssigkeiten. Die meisten blauen Körper, z. B. die Kupferoxydsalze, lassen die blauen Strahlen ungeschwächt, etwas weniger gut die grünen und violetten, schlecht dagegen die rothen und gelben hindurch. Die gelben Farbstoffe dagegen lassen

fast alle das Gelb ungeschwächt, gut auch noch Roth und Grün, schlechter Blau und Violett hindurch. Unter solchen Umständen wird durch eine Mischung einer gelben und blauen Flüssigkeit meistentheils das Grün am besten hindurchgehen, weil die blaue Flüssigkeit die rothen und gelben, die gelbe Flüssigkeit die blauen und violetten Strahlen zurückhält. Es ist eine Wirkung derselben Art, als wenn man Licht durch zwei verschiedenfarbige Glasplatten hinter einander gehen lässt, wodurch es immer viel mehr geschwächt wird, als wenn es durch zwei Platten gleicher Farbe gegangen ist. Aber es ist klar, dass hierbei keine Summation des Lichtes stattfindet, welches jede einzelne Flüssigkeit für sich hindurchlässt, sondern im Gegentheil eine Art von Subtraction, insofern die gelbe Flüssigkeit von den durch die blaue gegangenen Strahlen noch alle die wegnimmt, welche in ihr der Absorption verfallen. Daher sind auch Mischungen farbiger Flüssigkeiten in der Regel viel dunkler als jede einzelne Flüssigkeit für sich.

Bei den pulverigen Farbstoffen verhält es sich ganz ähnlich. Wir müssen jedes einzelne Pulvertheilchen eines Farbstoffes als ein kleines durchsichtiges Körperchen betrachten, welches das Licht durch Absorption färbt. Allerdings ist das Pulver solcher Farbstoffe im Ganzen genommen in hohem Grade undurchsichtig. Indessen wo wir Gelegenheit haben, Farbstoffe in zusammenhängenden Massen von gleichmässig dichter Structur zu sehen, finden wir sie wenigstens in dünnen Blättern durchsichtig. Ich erinnere an den krystallisirten Zinnober, Grünspan, Chromblei, das blaue Kobaltglas u. s. w., welche wir in fein pulverigem Zustande als Farbstoffe benutzen.

Wenn nun Licht auf ein solches aus durchsichtigen Theilen bestehendes Pulver fällt, wird ein kleiner Theil an der oberen Fläche reflectirt, der Rest dringt ein, und wird erst von den tiefer liegenden Begrenzungsflächen der Pulvertheilchen zurückgeworfen. Eine einzelne Tafel von weissem Glase reflectirt von senkrecht einfallendem Lichte $^1/_{25}$, zwei solche $^1/_{13}$, eine grosse Zahl fast alles. Bei Pulver aus weissem Glase müssen wir folglich schliessen, dass bei senkrechter Incidenz ebenfalls nur $^1/_{25}$ des auffallenden Lichts von der obersten Schicht reflectirt wird, das übrige von den tieferen Schichten. Ebenso muss es sich für blaues Licht bei blauem Glase verhalten. Es wird also bei farbigen Pulvern stets nur ein sehr kleiner Theil des Lichtes, welches sie geben, von der obersten Schicht reflectirt, bei weitem das meiste aus tieferen Schichten. Das von der obersten Fläche reflectirte Licht ist weiss, wenn die Reflexion nicht eine metallische ist, erst das aus den tieferen Flächen zurückkehrende ist durch Absorption gefärbt, um so tiefer, je länger sein Weg in der Substanz gewesen ist. Daher ist auch gröberes Pulver desselben Farbstoffs dunkler gefärbt als feineres. Bei der Reflexion kommt es nämlich nur auf die Zahl der Oberflächen an, nicht auf die Dicke der Theilchen. Sind letztere grösser, so muss das Licht einen längeren Weg in der Substanz zurücklegen, um die gleiche Menge reflectirender Oberflächen zu treffen, als wenn sie kleiner sind. Die Absorption der absorbirbaren Strahlen ist also in einem groben Pulver stärker, als in einem feineren. Jenes hat eine dunklere und gesättigtere Farbe als letzteres. Die Reflexion an den Oberflächen der Pulvertheilchen wird geschwächt,

wenn wir ein flüssiges Verbindungsmittel zwischen sie bringen, dessen Brechungsvermögen dem ihrigen näher steht als das der Luft. Trockene Pulver von Pigmenten sind deshalb in der Regel weisslicher, als wenn sie mit Wasser oder mit dem noch stärker brechenden Oel durchtränkt sind.

Wenn nun ein gemischtes farbiges Pulver Licht nur aus der obersten Schicht reflectirte, in welcher Theilchen von beiden Farben gleichmässig durch einander liegen, würde das zurückgeworfene Licht wirklich die Summe der Lichter sein, welche die einzelnen ungemischten Pulver geben. Für die grössere Menge reflectirten Lichtes aber, welches aus den tieferen Schichten zurückkommt, ist das Verhältniss ebenso wie bei gemischten farbigen Flüssigkeiten, oder hinter einander gelegten farbigen Gläsern. Dieses Licht hat auf seinem Wege Pulvertheilchen von beiderlei Art passiren müssen, und enthält also nur noch diejenigen Lichtstrahlen, welche durch beide Arten von Pulvertheilchen hindurchgehen können. Fur den grösseren Theil des Lichtes, welches von gemischtem Farbenpulver zurückgeworfen wird, findet also nicht eine Addition beider Farben, sondern in dem Sinne, wie vorher erläutert wurde, eine Subtraction statt. Daher erklärt sich auch die Thatsache, dass die Mischungen von Pigmenten viel dunkler sind, als die einfachen Pigmente, namentlich, wenn ihre Farben weit auseinander liegen. Zinnober und Ultramarin geben z. B. ein Schwarzgrau, welches kaum einen Schein von Violett, der Mischfarbe des rothen und blauen Lichtes, hat, weil das eine Pigment die Strahlen des anderen fast vollständig ausschliesst. Bequem kann man diese Unterschiede sichtbar machen, wenn man auf einen Farbenkreisel, *Fig. 112*, am Rande Sectoren *a* und *b* mit zwei einfachen Farbstoffen überzieht, in der Mitte *c* aber die Mischung der Farbstoffe selbst aufträgt. So geben Kobaltblau und Chromgelb am Rande, wo sie getrennt aufgetragen sind, und beim Drehen der Scheibe sich der Eindruck ihres farbigen Lichtes erst in der Netzhaut verbindet, weissliches Grau, während ihre materielle Mischung ein viel dunkleres Grün giebt.

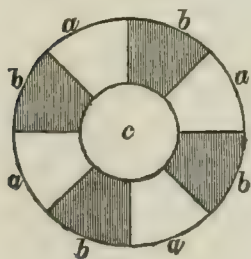


Fig. 112.

Es dürfen also die Resultate der Mischung von Malerfarben durchaus nicht benutzt werden, um daraus Schlüsse auf die Mischung farbigen Lichtes zu machen. So ist z. B. der Satz, dass Gelb und Blau Grün giebt, für die Mischung von Malerfarben ganz richtig, aber fälschlich auf die Mischung farbigen Lichtes übertragen worden.

Obgleich nun die Bezeichnungen **Farbenmischung** und **Mischfarbe** von der Mischung der Farbstoffe hergenommen sind, so wollen wir sie hier doch für die Zusammensetzung farbigen Lichtes beibehalten, auf welche sie nicht ganz rechtmässiger Weise übertragen sind, machen aber darauf aufmerksam, dass, wenn nicht ausdrücklich das Gegentheil gesagt ist, darunter nicht die Mischung von Farbstoffen und deren Resultat verstanden werden darf.

Durch die gleichzeitige Einwirkung verschiedener einfacher Farben auf dieselbe Stelle der Netzhaut entsteht nun eine neue Reihe von Farbenempfindungen, welche durch die einfachen Spectralfarben nicht hervorgebracht werden. Diese neuen Empfindungen sind die des **Purpurs**, des **Weiss** und der Uebergangsstufen des Weiss einerseits in die Spectralfarben und Purpur andererseits.

Purpurroth entsteht durch Mischung derjenigen einfachen Farben, welche am Ende des Spectrum stehen. Am gesättigtesten fällt es aus, wenn man Violett und Roth mischt, weisslicher wird es, Rosenroth, wenn man statt des Violett Blau und statt des Roth Orange nimmt. Das Purpurroth, welches durch Carminroth in das Roth des Spectrum übergeht, ist durchaus verschieden von den beiden Farben Roth und Violett, welche an den äussersten Grenzen des gewöhnlich sichtbaren Spectrum stehen, bildet aber für das Auge einen Uebergang zwischen beiden mit continuirlichen Zwischenstufen, so dass dadurch die Reihe der gesättigten Farben, d. h. derjenigen, welche die wenigste Aehnlichkeit mit Weiss haben, in sich zurücklaufend wird.

Weiss entsteht durch Zusammensetzung verschiedener Paare von einfachen Farben. Farben, welche in einem bestimmten Verhältnisse gemischt Weiss geben, nennt man complementäre Farben. Es sind unter den Spectralfarben complementär:

Roth	und	Grünlich Blau
Orange		Cyanblau
Gelb		Indigblau
Grünlich Gelb		Violett.

Das Grün des Spectrum hat keine einfache Complementärfarbe, sondern nur eine zusammengesetzte, nämlich Purpur.

Um zu ermitteln, ob etwa regelmässige Verhältnisse zwischen den Wellenlängen der einfachen complementären Farben bestehen, habe ich für eine Reihe complementärer Farbenpaare die Wellenlängen bestimmt, und lasse diese Messungen hier folgen. Die Längeneinheit ist ein Milliontheil eines Pariser Zolles.

Farbe.	Wellenlänge.	Complementärfarbe.	Wellenlänge.	Verhältniss der Wellenlängen.
Roth	2425	Grünblau	1818	1,334
Orange	2244	Blau	1809	1,240
Goldgelb	2162	Blau	1793	1,206
Goldgelb	2120	Blau	1781	1,190
Gelb	2095	Indigblau	1716	1,221
Gelb	2085	Indigblau	1706	1,222
Grüngelb	2082	Violett	von 1600 ab	1,301

Im Violett mussten seiner Lichtschwäche wegen die äussersten Strahlen von der Wellenlänge 1600 ab alle zusammengefasst werden.

Nach diesen Messungen sind in der Seite 278 stehenden *Fig. 113* in horizontaler Richtung die Wellenlängen der Farben von 1500 bis 2600 der obigen Einheiten aufgetragen, in verticaler die der zugehörigen Complementärfarben. Die Curven drücken also die Wellenlänge der Complementärfarbe als Function der Wellenlänge jeder einfachen Farbe aus. Am Rande stehen die Namen der den Wellenlängen entsprechenden Farben. Die wirklich gemessenen Werthe sind durch Sternchen oder Strichelchen, die die Curven schneiden, bezeichnet. Diese

Curven zeigen eine auffallende Unregelmässigkeit der Vertheilung der complementären Farben im Spectrum an. Wenn man auf der horizontalen Abscissenlinie vom Violett zum Roth fortschreitet, ändert sich die Wellenlänge der Complementärfarbe, wie die fast horizontal liegende Curve anzeigt, äusserst langsam. Gelangt man zu den grünlich blauen Farben, so ändert sich jene Länge dagegen ausserordentlich schnell, der aufsteigende Ast der Curve nähert sich einer senkrechten Linie. Das letztere ist ebenso im Gelb der Fall, während am rothen Ende die Aenderung wieder äusserst langsam wird. Es hängt dies damit zusammen, dass, wie ich schon im vorigen Paragraphen bemerkt habe, der Farbenton an den Enden des Spectrum sich im Verhältniss zu den Wellenlängen ausserordentlich langsam, in der Mitte dagegen sehr schnell ändert. Demgemäss ist denn auch zwischen den Wellenlängen verschiedener Complementärfarben durchaus kein einfaches oder constantes Verhältniss aufzufinden. Es schwankt, wenn man die musikalische Bezeichnungsweise anwendet, zwischen dem der Quarte (1,333) und dem der kleinen Terz (1,20).

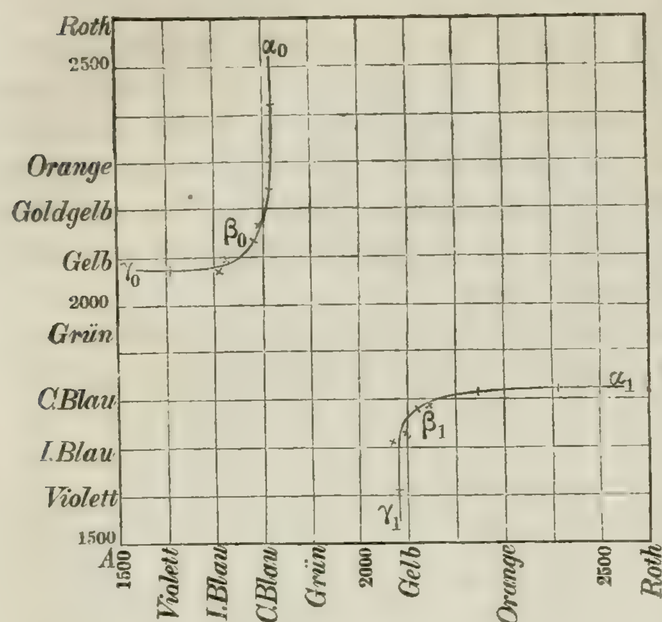


Fig. 115.

Ich bemerke übrigens hier noch, dass die Lichtintensitäten zweier complementärer einfacher Farben, welche zusammen gerade Weiss geben, dem Auge durchaus nicht immer gleich hell erscheinen. Nur bei der Mischung von Cyanblau und Orange sind Mengen beider Farben von einer dem Auge ungefähr gleich erscheinenden Lichtmenge nothwendig. Sonst erscheinen Violett, Indigblau und Roth dunkler als die complementären Mengen des dazu gehörigen Grünlichgelb, Gelb oder Grünlichblau. Da, wie sich im nächsten Paragraphen ergeben wird, die Vergleichungen der Helligkeit proportionaler Mengen verschiedenfarbigen Lichtes durch das Auge sehr verschieden ausfallen bei verschiedener absoluter Lichtstärke, so lassen sich auch für die Verhältnisse der Helligkeit complementärer Mengen verschiedener Farbenpaare keine bestimmten Zahlen angeben.

Die Spectralfarben haben demnach in Mischungen verschiedene färbende Kraft, sie sind gleichsam Farben von verschiedenem Sättigungsgrade. Violett ist am meisten gesättigt, die anderen folgen ungefähr in folgender Reihe:

Violett
Indigblau
Roth Cyanblau
Orange Grün
Gelb.

Endlich haben wir noch die Resultate der Mischung solcher Farben zu untersuchen, welche nicht complementär sind. Darüber lässt sich folgende Regel aufstellen: Wenn man zwei einfache Farben mischt, die im Spectrum weniger von einander entfernt sind, als Complementärfarben, so ist die Mischung eine der zwischenliegenden Farben und zieht desto mehr in das Weisse, je grösser der Abstand der gemischten Farben ist, wird dagegen desto gesättigter, je kleiner ihr Abstand. Mischt man dagegen zwei Farben, die in der Spectralreihe weiter von einander abstehen, als Complementärfarben, so erhält man Purpur oder solche Farben, die zwischen einer der gemischten und dem entsprechenden Ende des Spectrum liegen. In diesem Falle ist die Mischung desto gesättigter, je grösser der Abstand der gemischten Farben im Spectrum ist, sie ist desto weisslicher, je kleiner ihr Abstand ist, vorausgesetzt, dass er immer grösser bleibt, als der von zwei Complementärfarben.

So giebt zum Beispiel Roth, dessen Complementärfarbe Grünlichblau ist, mit Grün gemischt weissliches Gelb, welches bei wechselnden Mengenverhältnissen der einfachen Farben entweder durch Orange in Roth, oder durch Grünlichgelb in Grün übergehen kann. Orange und Grünlichgelb können gemischt auch reines Gelb geben, welches dann aber gesättigter ist, als das aus Roth und Grün erzeugte. Mischen wir dagegen Roth und Cyanblau, so bekommen wir Rosa (weissliches Purpurroth), welches bei verändertem Mischungsverhältnisse in Roth oder durch Violett und Indigblau in Cyanblau übergehen kann. Dagegen giebt Roth mit Indigblau, und noch mehr mit Violett ein gesättigtes Purpurroth.

Die folgende Tabelle zeigt diese Resultate übersichtlich. An der Spitze der verticalen und horizontalen Columnen stehen die einfachen Farben; wo sich die betreffende verticale und horizontale Columne schneiden, ist die Mischfarbe angegeben, welche übrigens immer bei verändertem Mischungsverhältnisse durch die in der Spectralreihe dazwischenliegenden Farben in jede der beiden einfachen Farben der Mischung übergehen kann.

	Violett	Indigblau	Cyanblau	Blaugrün	Grün	Grüngelb	Gelb
Roth	Purpur	dk. Rosa	wss. Rosa	Weiss	wss. Gelb	Goldgelb	Orange
Orange	dk. Rosa	wss. Rosa	Weiss	wss. Gelb	Gelb	Gelb	
Gelb	wss. Rosa	Weiss	wss. Grün	wss. Grün	Grüngelb		
Grüngelb	Weiss	wss. Grün	wss. Grün	Grün			
Grün	wss. Blau	Wasserblau	Blaugrün				
Blaugrün	Wasserblau	Wasserblau					
Cyanblau	Indigblau						

dk. = dunkel
wss. = weisslich.

Uebrigens zeigt es sich auch bei diesen Mischungen wieder, dass die Spectralfarben einen verschiedenen Sättigungsgrad der Farbe haben. So giebt Roth mit gleich hellem Grün gemischt ein röthliches Orange, Violett mit gleich hellem Grün ein dem Violett nahestehendes Indigblau. Dagegen geben Farben von gleicher Sättigung in gleicher Helligkeit gemischt auch Mischfarben, die von ihren beiden Constituenten ungefähr um gleichviel verschieden sind.

Durch Mischung von mehr als zwei homogenen Farben bekommen wir nun keine neuen Farben mehr, sondern die Zahl derselben ist durch die Mischungen je zweier einfacher Farben schon erschöpft, ja wir haben ja schon bei den letzteren Mischungen gefunden, dass die meisten Mischfarben durch verschiedene Paare von einfachen Farben erzeugt werden konnten. Die Mischungen von zusammengesetzten Farben haben im Allgemeinen dasselbe Ergebniss, wie die Mischung der gleichnamigen Spectralfarben, nur fällt die Mischung um so weisslicher aus, als die gemischten Farben selbst schon weisslicher sind, als Spectralfarben.

Somit führen alle möglichen Combinationen von Aetherwellensystemen verschiedener Schwingungsdauer nur zu einer verhältnissmässig geringen Anzahl verschiedenartiger Erregungszustände des Sehnervenapparates, welche sich in verschiedenen Farbenempfindungen zu erkennen geben. Wir haben als solche kennen gelernt zuerst die Reihe der gesättigten Farben, nämlich der prismatischen Farben, und das die Enden dieser Reihe verbindende Purpur. Jede dieser Farben kann wiederum in verschiedenen Abstufungen mehr oder weniger weisslich vorkommen, und je weisslicher sie ist, desto weniger gesättigt erscheint sie uns. Die am meisten weisslichen Abstufungen dieser Farben gehen endlich in das reine Weiss über. Wir haben hier also zweierlei Arten von Unterschieden zwischen den Farben, nämlich erstens die Unterschiede des Farbentons und zweitens die Unterschiede der Sättigung. Die Unterschiede des Farbentons sind denen zwischen den Spectralfarben entsprechend. Denken wir diese mit geringeren oder grösseren Quantitäten weissen Lichts gemischt, so bekommen wir die verschiedenen Sättigungsstufen des betreffenden Farbentons, und können den Grad der Sättigung durch das Verhältniss zwischen den gemischten Lichtmengen der gesättigten Farbe und des Weiss bezeichnen. In der Sprache bezeichnen wir nur selten die weisslichen Farben mit besonderen Namen, wie z. B. weissliches Purpur mit Rosa, weissliches Roth mit Fleischfarbe, weissliches Blau mit Himmelblau, sondern setzen, um sie zu bezeichnen, vor den Namen der Farbe die Zusätze hell, blass oder weiss, wie z. B. hellblau ungefähr dasselbe wie Himmelblau, blassblau ein noch weisslicheres Blau, endlich weissblau ein von Weiss wenig unterschiedenes Blau bezeichnet. Betreffs der Bezeichnung weisslicher Farben durch die Vorsatzsylbe „hell", ist noch zu bemerken, dass diese ihrem Sinne nach eigentlich eine lichtstarke Farbe bezeichnet, und hier der Sprachgebrauch eine lichtstarke Farbe nicht von einer weisslichen unterscheidet, was der im vorigen Paragraphen erwähnten Thatsache entspricht, dass auch dem Auge die lichtstarken gesättigten Farben des Spectrum weisslich erscheinen.

Endlich werden auch noch Unterschiede der Lichtstärke von der Sprache als Arten von Farben bezeichnet, aber nur insofern wir die Farbe als eine Eigenschaft von Körpern betrachten. Mangel des Lichts nennen wir Dunkelheit; einen Körper aber, der kein Licht reflectirt, wenn es auf ihn fällt, nennen wir schwarz; einen Körper dagegen, welcher alles auffallende Licht diffus reflectirt, nennen wir weiss. Ein Körper, der von allem auffallenden Lichte einen gleichen Antheil, aber nicht das Ganze reflectirt, ist grau, und einer, der Licht gewisser Farbe stärker reflectirt als anderes, ist farbig. In diesem Sinne

also sind auch Weiss, Grau und Schwarz Farben. Lichtschwache gesättigte Farben unterscheiden wir durch den Zusatz „dunkel", wie dunkelgrün, dunkelblau; bei äusserst geringer Lichtstärke wenden wir für sie aber auch dieselben Namen an, wie für lichtschwache weissliche Farben, nämlich für lichtschwaches Roth, Gelb, Grün die Namen Rothbraun, Braun und Olivengrün, für überwiegend weissliche Farben von geringer Lichtstärke wählt man dagegen Bezeichnungen wie röthlichgrau, gelbgrau, blaugrau u. s. w.

Das Schwarz ist eine wirkliche Empfindung, wenn es auch durch Abwesenheit alles Lichts hervorgebracht wird. Wir unterscheiden die Empfindung des Schwarz deutlich von dem Mangel aller Empfindung. Ein Fleck unseres Gesichtsfeldes, von welchem kein Licht in unser Auge fällt, erscheint uns schwarz, aber die Objecte hinter unserem Rücken, von denen auch kein Licht in unser Auge fällt, mögen sie nun dunkel oder hell sein, erscheinen uns nicht schwarz, sondern für sie mangelt alle Empfindung. Bei geschlossenen Augen sind wir uns sehr wohl bewusst, dass das schwarze Gesichtsfeld seine Grenze hat, wir lassen es keineswegs sich bis hinter unseren Rücken erstrecken. Nur diejenigen Theile des Gesichtsfeldes, deren Licht wir wahrnehmen können, wenn solches vorhanden ist, erscheinen schwarz, wenn sie kein Licht aussenden.

Dass Grau identisch sei mit lichtschwachem Weiss, Braun mit lichtschwachem Gelb, Rothbraun mit lichtschwachem Roth, erkennt man am leichtesten durch die prismatische Analyse des Lichts von grauen, blauen oder rothbraunen Körpern, schwerer durch Projection des Lichts von der betreffenden Farbe und Stärke auf einen Schirm, weil wir fortdauernd die Neigung haben zu trennen, was in der Farbe oder dem Aussehen eines Körpers von der Beleuchtung und was von der Eigenthümlichkeit der Körperoberfläche selbst herrührt. Der Versuch muss deshalb so eingerichtet werden, dass der Beobachter verhindert wird zu erkennen, es sei eine besondere Beleuchtung vorhanden. Ein graues Papierblatt, welches im Sonnenschein liegt, kann heller aussehen, als ein weisses, welches im Schatten liegt, während doch das erstere grau, das zweite weiss erscheint, weil wir sehr gut wissen, dass das weisse Blatt in den Sonnenschein gelegt, viel heller sein würde, als das graue, welches zur Zeit darin sich befindet. Wenn man aber eine graue Kreisfläche auf weissem Papier anbringt, und durch eine Sammellinse Licht auf sie concentrirt, ohne dass das weisse Papier gleichzeitig mitbeleuchtet wird, so kann man das Grau weisser erscheinen lassen, als das weisse Papier, so dass in diesem Falle, wo der unbewusste Einfluss des Urtheils ausgeschlossen ist, die Empfindungsqualität durchaus nur als abhängig von der Lichtstärke erscheint.

Ebenso gelang es mir homogenes Goldgelb des Spectrum als Braun erscheinen zu lassen, indem ich mittels einer unten auseinander zu setzenden Methode auf einem weissen unbeleuchteten Schirme ein rechteckiges Feldchen damit beleuchtete, daneben ein grösseres Feld des Schirms dagegen mit hellerem weissen Lichte. Roth in derselben Weise angewendet gab Rothbraun, Grün, Olivengrün.

Berücksichtigen wir also noch die Lichtintensität, so finden wir, dass die Qualität eines jeden Farbeneindrucks von drei veränderlichen Grössen abhängt, nämlich der Lichtstärke, dem Farbentone und seinem Sättigungsgrade.

Andere Unterschiede der Qualität des Lichteindrucks existiren nicht. Man kann dieses Resultat in folgender Weise aussprechen:

Der Farbeneindruck, den eine gewisse Quantität x beliebig gemischten Lichtes macht, kann stets auch hervorgebracht werden durch Mischung einer gewissen Quantität a weissen Lichtes und einer gewissen Quantität b einer gesättigten Farbe (Spectralfarbe oder Purpur) von bestimmtem Farbentone.

Dieser Satz beschränkt die Menge der verschiedenartigen Farbeneindrücke, wenn sie auch noch unendlich gross bleibt, doch auf ein kleineres Maass, als wenn jede mögliche Combination verschiedener einfacher Lichtstrahlen einen besonderen Farbeneindruck gäbe. Wollen wir die objective Natur eines gemischten Lichts vollständig bestimmen, so müssen wir angeben, wieviel Licht von jeder Grösse der Wellenlänge darin ist. Da es nun unendlich verschiedene Wellenlängen giebt, ist die physikalische Qualität eines gemischten Lichts nur darzustellen als eine Function von unendlich vielen Unbekannten. Dagegen kann der Eindruck, den beliebig gemischtes Licht auf das Auge macht, immer dargestellt werden als eine Function von nur drei Variablen, die in Zahlen ausgedrückt werden können, nämlich 1) der Quantität gesättigten farbigen Lichts, 2) der Quantität weissen Lichts, die gemischt dieselbe Farbenempfindung geben, 3) der Wellenlänge des farbigen Lichts. Dadurch gewinnen wir auch endlich ein Princip, wonach wir die Farben in eine systematische Ordnung bringen können. Abstrahirt man nämlich zunächst von den Unterschieden der Lichtstärke, so bleiben noch zwei Veränderliche übrig, von denen die Qualität der Farbe abhängt, nämlich der Farbenton und das Verhältniss des farbigen zum weissen Lichte, und wir können uns die Menge der Farben, wie die verschiedenen Werthe einer jeden Grösse, welche von zwei Variablen abhängt, in einer Ebene nach ihren zwei Dimensionen hin ausgebreitet denken. Die Reihe der gesättigten Farben ist in sich zurücklaufend, sie muss also auf einer geschlossenen Curve angebracht werden, für welche Newton einen Kreis, *Fig. 114*, wählte in dessen Mitte das Weiss steht. Auf den Verbindungslinien des Mittelpunktes mit den einzelnen Punkten der Peripherie sind die Uebergangsstufen zwischen dem Weiss und der an dem betreffenden Punkte der Peripherie stehenden gesättigten Farbe anzubringen, so dass die weisslicheren unter ihnen dem Mittelpunkte, die gesättigteren der Peripherie näher stehen. So erhält man eine Farbentafel, die alle möglichen Arten gleich lichtstarker Farben in ihren continuirlichen Uebergängen geordnet darbietet. Wollte man auch noch die verschiedenen Grade der Lichtstärke der Körperfarben berücksichtigen, so müsste man, wie Lambert es that, noch die dritte Dimension des Raums zu Hülfe nehmen, und zwar kann man die dunkelsten Farben, bei denen die Zahl der unterscheidbaren Töne immer geringer wird, endlich in eine Spitze, dem Schwarz entsprechend, zusammenlaufen lassen. So

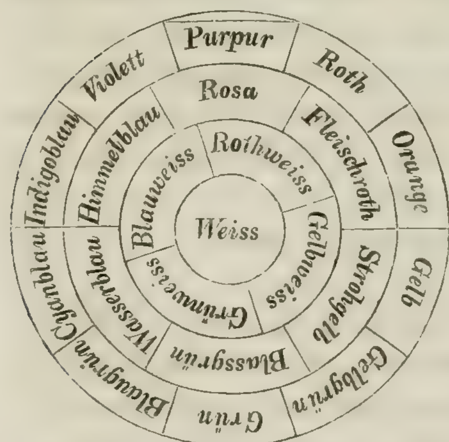


Fig. 114.

erhält man eine Farbenpyramide oder einen Farbenkegel. In *Fig. 115* sind drei Querschnitte eines solchen Kegels über einander liegend dargestellt. Der grösste, der Grundfläche entsprechend, würde dieselbe Farbenvertheilung wie der Farbenkreis *Fig. 114* zeigen müssen. Der mittlere, aus der Mitte des Kegels genommen, zeigt am Rande das Rothbraun, Braun, Olivengrün, Graublau und in seiner Mitte Grau, endlich der kleinste, nahe an der Spitze des Kegels genommen, zeigt Schwarz, wie es die Figur sehen lässt.

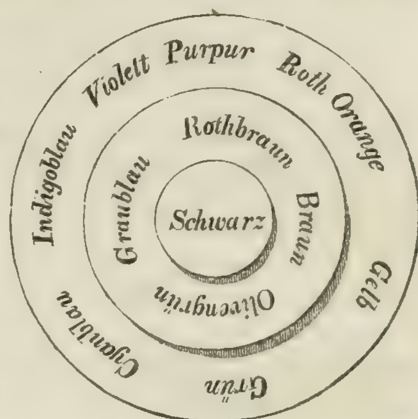


Fig. 115.

Newton hat die Anordnung der Farben in einer Ebene auch noch benutzt, um das Farbenmischungsgesetz auszudrücken. Er dachte sich die Intensität der gemischten Lichter durch Gewichte ausgedrückt, diese Gewichte in der Farbentafel am Orte der betreffenden Farbe angebracht, und construirte den Schwerpunkt der Gewichte, dann soll der Ort dieses Schwerpunkts in der Farbentafel die Mischfarbe geben, die Summe der Gewichte ihre Intensität. Grassmann hat die Principien, welche in diesem Newton'schen Verfahren verborgen liegen, entwickelt und ausgesprochen. Ausser dem schon oben erwähnten Satze, dass:

1) Jede beliebig zusammengesetzte Mischfarbe gleich aussehen müsse, wie die Mischung einer bestimmten gesättigten Farbe mit Weiss, sind dazu noch folgende Sätze nothwendig:
2) Wenn von zwei zu vermischenden Lichtern das eine sich stetig ändert, ändert sich auch das Aussehen der Mischung stetig.
3) Gleich aussehende Farben gemischt geben gleich aussehende Mischungen.

Wenn wir diese drei Grundsätze annehmen, lässt sich eine Anordnung der Farben in einer Ebene herstellen, welche erlaubt, die Mischfarbe durch eine Schwerpunktsconstruction zu finden. Wir wollen eine solche Farbentafel, in welcher die Mischfarben nach dem Princip der Schwerpunktsconstructionen gefunden werden, eine geometrische Farbentafel nennen. Da die Lichtintensitäten verschiedenfarbigen Lichtes keine allgemeingültig quantitative Vergleichung durch das Auge zulassen, so muss man sich bei der Construction einer solchen Tafel vorbehalten, die Einheit der Lichtquantität jeder Farbe durch die Newton'sche Regel der Farbenmischung selbst festzusetzen. Wenn man drei Farben beliebig wählt, von denen aber keine durch Mischung der beiden anderen erzeugt werden kann, ihnen drei beliebige Orte in der Farbentafel anweist, die nicht in einer geraden Linie liegen, und die Einheiten ihrer Lichtintensität beliebig festsetzt, so ist nachher der Ort und die Einheit der Lichtintensität jeder anderen Farbe in der Farbentafel fest bestimmt.

Construction der Farbentafel. Wenn die drei Farben A, B, C, von denen man ausgehen will, gewählt, die Einheiten ihrer Lichtintensität und ihre Orte in der Farbentafel bestimmt sind, die wir mit a, b und c in *Fig. 116* (Seite 284) bezeichnen wollen, so mische man die Quantitäten α der Farbe A und β der Farbe

B, und setze die Mischfarbe in den gemeinschaftlichen Schwerpunkt der Gewichte α und β, von denen α im Punkt a und β im Punkte b befindlich gedacht wird. Der Schwerpunkt d liegt in der Verbindungslinie ab der beiden Gewichte und es muss sein

$$\alpha \times ad = \beta \times bd.$$

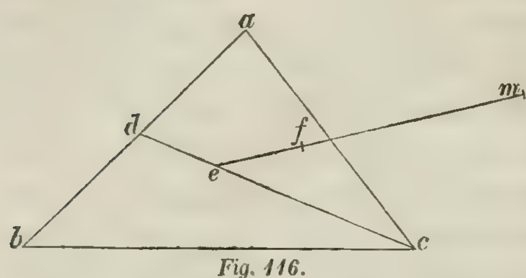


Fig. 116.

So liegen denn überhaupt alle Mischfarben von A und B auf der Linie ab. Soll nun mit den Quantitäten α und β der Farben A und B auch noch die Quantität γ der Farbe C gemischt werden, so können wir erst α und β wie vorher gemischt denken, die Mischfarbe, deren Quantität mit $\alpha + \beta$ bezeichnet werden muss, in d eingesetzt, und nun den Schwerpunkt e der beiden Gewichte $\alpha + \beta$ in d und γ in c construiren, welcher in der Linie cd liegen muss. Hier ist der Ort der gemeinsamen Mischfarbe, deren Quantität ε gesetzt werden muss

$$\varepsilon = \alpha + \beta + \gamma.$$

Dadurch ist auch die Einheit der Lichtstärke für diese Farbe bestimmt; diese ist

$$1 = \frac{\varepsilon}{\alpha + \beta + \gamma}.$$

Es ist dabei ersichtlich, dass jede aus den drei Farben A, B, C mischbare Farbe innerhalb des Dreiecks abc liegen muss; für jede ist in der angegebenen Weise Ort und Einheit der Lichtstärke zu bestimmen.

Denkt man sich die Orte und Maasseinheiten aller aus den drei Farben A, B und C mischbaren Farben bestimmt, so kann man nun auch die Orte und Maasseinheiten der aus A, B und C nicht mischbaren Farben bestimmen. Es sei M eine solche Farbe. Man kann jedenfalls eine so kleine Quantität μ dieser Farbe wählen, dass, wenn man sie mit einer der Farben des Dreiecks mischt, die Mischfarbe auch noch innerhalb des Dreiecks liegt. Man mische sie z. B. mit der Quantität ε (diese nach der schon festgesetzten Einheit gemessen) der in e befindlichen Farbe. Denkt man sich die Quantität der Farbe M anfangs unendlich klein, und stetig steigend bis μ, so wird die Mischfarbe anfangs die in e befindliche Farbe selbst sein, sich nach dem vorangestellten Grundsatze stetig ändern, d. h. continuirlich in die benachbarten Farben übergehen. Ist die Quantität von M bis μ gewachsen, so möge f der Ort und φ die Quantität der betreffenden Mischfarbe sein, und f noch innerhalb des Dreiecks liegen. Gemäss unserer Regel muss erstens sein

$$\varphi = \varepsilon + \mu.$$

Dadurch ist die Quantität μ auf die von uns festgesetzten Maasseinheiten zurückgeführt. Zweitens muss f der Schwerpunkt von μ in m und ε in e sein, d. h. es muss m in der Verlängerung der Linie ef liegen, und

$$\frac{mf}{ef} = \frac{\varepsilon}{\mu}.$$

Dadurch ist also auch die Lage und die Maasseinheit der Farbe M festgesetzt und kann ebenso für alle anderen aus A, B und C nicht mischbaren Farben bestimmt werden.

Beweis der Richtigkeit dieser Construction. Es muss nun gezeigt werden, dass in einer so construirten Farbentafel, für welche auch die Maassein-

heiten der Lichtquantität der verschiedenen Farben in der angegebenen Weise festgesetzt sind, die Mischfarbe zweier beliebigen Farben sich im Schwerpunkte der gemischten Farben vorfindet, und ihre Lichtintensität, nach den festgesetzten Einheiten gemessen, gleich ist der Summe der Quantitäten der gemischten Lichter.

Wenn wir uns die Lage der Massenpunkte m_1, m_2, m_3 u. s. w. durch rechtwinkelige Coordinaten x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3 u. s. w. gegeben denken, so sind die Coordinaten X und Y des Schwerpunkts gegeben durch die Gleichungen

$$X(m_1 + m_2 + m_3 + \text{etc.}) = m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \text{etc.}$$
$$Y(m_1 + m_2 + m_3 + \text{etc.}) = m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + \text{etc.}$$

Im Folgenden bezeichnen wir die Coordinaten des mit irgend einem beliebigen Buchstaben n bezeichneten Punktes mit x_n und y_n.

A. Es sollen gemischt werden zwei Farben E_0 und E_1, welche selbst aus den drei ursprünglich gewählten Farben A, B und C gemischt werden können. Es seien die Quantitäten ε_0 und ε_1 der Farben E_0 und E_1 mischbar aus den Quantitäten α_0, β_0, γ_0 und beziehlich α_1, β_1, γ_1 der Farben A, B, C, so ist nach der Constructionsregel, wenn wir mit x_0 y_0 die Coordinaten des Ortes von ε_0 mit x_1, y_1 die von ε_1 in der Farbentafel bezeichnen

$$x_0(\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0) = \alpha_0 x_a + \beta_0 x_b + \gamma_0 x_c$$
$$x_1(\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) = \alpha_1 x_a + \beta_1 x_b + \gamma_1 x_c$$
$$y_0(\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0) = \alpha_0 y_a + \beta_0 y_b + \gamma_0 y_c$$
$$y_1(\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) = \alpha_1 y_a + \beta_1 y_b + \gamma_1 y_c$$
$$\varepsilon_0 = \alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0$$
$$\varepsilon_1 = \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1$$

Nun ist nach dem Grundsatze, dass gleichaussehende Farben gemischt gleichaussehende Mischfarben geben, die Mischfarbe von ε_0 und ε_1 dieselbe wie von α_0 β_0 γ_0 und α_1 β_1 und γ_1, die Coordinaten X und Y des Ortes der letzteren Mischung sind bei der Construction der Farbentafel durch die Gleichungen

$$X(\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 + \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) = (\alpha_0 + \alpha_1) x_a + (\beta_0 + \beta_1) x_b + (\gamma_0 + \gamma_0) x_c$$
$$Y(\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 + \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) = (\alpha_0 + \alpha_1) y_a + (\beta_0 + \beta_1) y_b + (\gamma_0 + \gamma_0) y_c$$

oder indem man mittels der obigen sechs Gleichungen x_a, x_b, x_c und y_a, y_b und y_c eliminirt

$$X(\varepsilon_0 + \varepsilon_1) = \varepsilon_0 x_0 + \varepsilon_1 x_1$$
$$Y(\varepsilon_0 + \varepsilon_1) = \varepsilon_0 y_0 + \varepsilon_1 y_1$$

d. h. die Coordinaten x, y der Mischfarbe von ε_0 und ε_1 sind dieselben, wie die des Schwerpunkts von ε_0 und ε_1.

Die gesammte Lichtquantität q der Mischung von ε_0 und ε_1 muss wiederum gleich sein der Lichtquantität, welche bei Mischung der gleichaussehenden Quantitäten $\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0$ einerseits und $\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1$ andererseits entsteht, d. h.

$$q = \alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 + \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_1,$$

womit die Richtigkeit der gegebenen Constructionsregel für alle aus A, B und C mischbaren Farben auf der in gesagter Weise construirten Farbentafel erwiesen ist.

B. Wenn zwei nicht aus A, B und C mischbare Farben M_0 und M_1 gemischt werden sollen. Es seien x_0, y_0 die Coordinaten, μ_0 die Quantität der

Farbe M_0, x_1 und y_1 seien die Coordinaten, μ_1 die Quantität der Farbe M_1. Es sei der Ort von M_0 in der Farbentafel dadurch gefunden worden, dass die Quantität μ_0 mit der Quantität ε_0 der im Punkte e befindlichen Farbe E gemischt, die Quantität φ der in f befindlichen Farbe F gegeben hat, so ist

$$\varepsilon_0 + \mu_0 = \varphi$$
$$\varphi x_f = \varepsilon_0 x_e + \mu_0 x_0$$
$$\varphi y_f = \varepsilon_0 y_e + \mu_0 y_0.$$

Ebenso sei der Ort der Farbe M_1 dadurch gefunden worden, dass μ_1 gemischt mit der Quantität ε_1 der Farbe E die Quantität ψ der im Punkte g befindlichen Farbe G gegeben hat. Es ist

$$\varepsilon_1 + \mu_1 = \psi$$
$$\psi x_g = \varepsilon_1 x_e + \mu_1 x_1$$
$$\psi y_g = \varepsilon_1 y_e + \mu_1 y_1.$$

Um den Ort der Mischfarbe von μ_0 und μ_1 in derselben Weise zu bestimmen, mische man diese mit der Quantität $\varepsilon_0 + \varepsilon_1$ der Farbe E. Dies kommt aber darauf hinaus, dass man die Quantitäten φ und ψ der Farben F und G mischt. Die Coordinaten dieser Mischfarbe seien ξ und v, gegeben durch die Gleichungen

$$(\varphi + \psi)\,\xi = \varphi x_f + \psi x_g$$
$$(\varphi + \psi)\,v = \varphi y_f + \psi y_g.$$

Dann sind die Coordinaten X und Y der Mischfarbe von μ_0 und μ_1, deren noch unbestimmte Quantität mit η bezeichnet werde, gegeben durch die Gleichungen

$$(\varphi + \psi)\,\xi = (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)\,x_e + \eta X$$
$$(\varphi + \psi)\,v = (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)\,y_e + \eta Y$$
$$\varphi + \psi = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \eta.$$

Indem man mit Hülfe der früheren Gleichungen hieraus φ, ψ, x_e und y_e eliminirt, erhält man:

$$\mu_0 x_0 + \mu_1 x_1 = \eta X$$
$$\mu_0 y_0 + \mu_1 y_1 = \eta Y$$
$$\mu_0 + \mu_1 = \eta,$$

wonach die Mischfarbe von μ_0 und μ_1 wirklich, wie verlangt wurde, im Schwerpunkte beider Massen liegt, und ihre Quantität der Summe beider Quantitäten gleich ist.

C. Wenn eine aus A, B, C mischbare und eine nicht mischbare Farbe gemischt werden sollen, ist ähnlich zu verfahren, wie im Falle B. Es sei μ_0 die Menge der aus A, B, C nicht mischbaren Farbe und ihre Coordinaten x_0, y_0 seien dadurch gefunden, dass sie mit der Quantität ε_0 der im Punkte E stehenden Farbe gemischt, die Quantität φ der in F stehenden Farbe gegeben habe. Demnach ist

$$\mu_0 x_0 + \varepsilon_0 x_e = \varphi x_f$$
$$\mu_0 y_0 + \varepsilon_0 y_e = \varphi y_f$$
$$\mu_0 + \varepsilon_0 = \varphi.$$

Der Ort der Mischfarbe η aus μ_0 und einer aus A, B, C mischbaren Farbe μ, im Punkte G befindlich, ergiebt sich, indem man η mit ε_0 mischt, und dann nach der ge-

gebenen Constructionsregel weiter verfährt. Da aber η aus μ_0 und μ_1 zusammengesetzt ist, kann man auch zuerst μ_0 und ε_0 mischen, wobei man nach der Voraussetzung die Quantität φ der in F stehenden Farbe erhält, und dann φ mit μ_1. Der gemeinsame Schwerpunkt beider ist der Ort der Mischfarbe von η und ε_0, seine Coordinaten ξ und v sind durch folgende Gleichungen gegeben

$$(\varphi + \mu_1)\,\xi = \varphi\, x_f + \mu\, x_g$$
$$(\varphi + \mu_1)\,v = \varphi\, y_f + \mu\, y_g.$$

Die Coordinaten X und Y von η sind nun nach der aufgestellten Constructionsregel zu finden durch die Gleichungen

$$(\varphi + \mu_1)\,\xi = \eta\, X + \varepsilon_0\, x_e$$
$$(\varphi + \mu_1)\,v = \eta\, Y + \varepsilon_0\, y_e$$
$$\varphi + \mu_1 = \eta + \varepsilon_0,$$

woraus schliesslich folgt

$$\eta\, X = \mu_0\, x_0 + \mu_1\, x_g$$
$$\eta\, Y = \mu_0\, y_0 + \mu_1\, y_g$$
$$\eta = \mu_0 + \mu_1,$$

was zu erweisen war.

Bisher haben wir zur Bestimmung des Ortes der aus A, B, C nicht mischbaren Farben immer nur ihre Mischung mit einer einzigen Farbe E angewendet. Der letzte Satz zeigt aber, dass auch die Anwendung jeder anderen Farbe G dieselben Bestimmungen der Farbenorte geben würde.

Es lässt sich nicht von vorn herein übersehen, welche Gestalt die Curve haben werde, in welche bei einer solchen Construction die einfachen Farben zu stehen kommen. Diese Curve wird sogar sehr mannigfach sein können, je nach der Wahl der drei Farben, mit denen man die Construction beginnt, und ihrer drei Maasseinheiten, die man willkührlich festsetzt. Eine Maasseinheit muss immer willkührlich bleiben, ebenso die Lage zweier Punkte, in die man zwei der gewählten Farben setzt. Erst von den anderen 4 Stücken hängt dann die Form jener Curve ab. Man kann also noch vier Bedingungen festsetzen, welche sich im Allgemeinen durch eine entsprechende Wahl der vier anderen willkührlich gebliebenen Grössen werden erfüllen lassen. So würde man zum Beispiel verlangen können, dass in der Farbentafel die Entfernung fünf beliebig gewählter einfacher Farben vom Weiss gleich gross sein solle. Es würde alsdann die Grenzcurve der Farbentafel, welche die einfachen Farben enthält, sich kaum merklich von Newton's Kreise unterscheiden, wie er in *Fig. 114* dargestellt ist, nur würde zwischen dem äussersten Roth und Violett die Sehne, welche dort gezeichnet ist, statt des Bogens die Fläche begrenzen müssen, weil das Purpur, welches nur aus den beiden genannten Farben gemischt werden kann, auf der geraden Verbindungslinie beider Farben liegen müsste. Ausserdem folgt aus den Principien der Construction, dass jede zwei Complementärfarben an entgegengesetzten Enden eines Durchmessers des Kreises liegen müssen, weil die Mischfarbe Weiss immer in der Verbindungslinie derjenigen Farben liegen muss, aus denen sie gemischt ist. Diese Bedingung ist auch in *Fig. 114* erfüllt.

Was die festzusetzenden Maasseinheiten der Lichtintensität verschiedenfarbigen Lichts betrifft, so würden für diesen Fall, wo man das Farbenfeld durch eine Kreislinie begrenzen lässt, complementäre Mengen der Complementärfarben, d. h. solche Mengen, welche gemischt weiss geben, als gleich gross angesehen werden müssen, weil nach der Voraussetzung ihre Mischfarbe Weiss gleich weit von ihnen entfernt liegt. Der Schwerpunkt zweier Gewichte kann aber nur dann im Mittelpunkte ihrer Verbindungslinie liegen, wenn die Gewichte gleich sind. Ferner würden von anderen nicht complementären Farben solche Mengen als gleich gross angesehen werden, welche mit einer genügenden Quantität ihrer Complementärfarbe vereinigt gleiche Quantitäten Weiss geben. Aus dem, was ich früher über die verschiedene Sättigung der Spectralfarben angeführt habe, geht schon hervor, dass die Quantitäten, welche hier als gleich betrachtet werden, dem Auge durchaus nicht gleich hell erscheinen. Im nächsten Paragraphen indessen wird sich zeigen, dass die Vergleichung der Helligkeit durch das Auge bei verschiedener absoluter Lichtstärke sehr verschiedene Resultate ergiebt, und dass im Gegentheil eine Festsetzung der Maasseinheit verschiedener Farben nach den Resultaten der Mischung in einem gewissen Sinne wenigstens für alle Grade der Lichtstärke gültig bleibt.

Will man dagegen in der Farbentafel als gleich gross solche Quantitäten verschiedenfarbigen Lichts betrachten, welche dem Auge bei einer gewissen absoluten Lichtintensität als gleich hell erscheinen, so erhält die Curve der einfachen Farben eine ganz andere Gestalt ähnlich wie in *Fig. 117.* Die gesättigten Farben Violett und Roth müssen weiter vom Weiss entfernt sein, als ihre weniger gesättigten Complementärfarben, weil nach dem Urtheile des Auges bei der Mischung von Gelbgrün und Violett zu Weiss die Quantität violetten Lichtes viel kleiner ist, als die des gelbgrünen, und wenn das Weiss im Schwerpunkte beider liegen soll, die kleinere Quantität Violett an einem grösseren Hebelarme wirken muss, als die grössere Lichtmenge des Gelbgrün. Uebrigens würden auch hier wieder die Spectralfarben an der Peripherie der Curve, das Purpur auf einer Sehne stehen müssen, Complementärfarben an den entgegengesetzten Enden von Sehnen, welche durch den Ort des Weiss gelegt sind, wie bei der kreisförmigen *Fig. 114.*

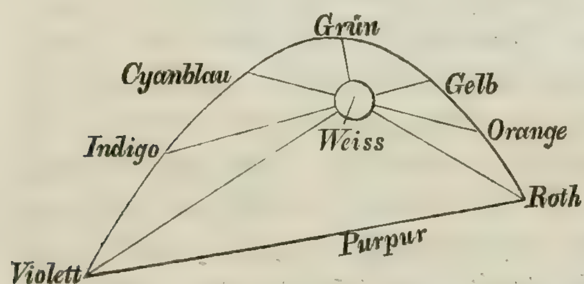


Fig. 117.

Die Zurückführung des Farbenmischungsgesetzes auf Schwerpunktconstructionen wurde zuerst von Newton nur als eine Art mathematischen Bildes vorgeschlagen, um die grosse Menge der Thatsachen dadurch auszudrücken, und er stützte sich nur darauf, dass die Folgerungen aus jener Darstellung qualitativ mit den Erfahrungsthatsachen übereinstimmten, ohne dass er quantitative Prüfungen ausgeführt hätte. Dergleichen quantitative Prüfungen sind dagegen in neuester Zeit von Maxwell ausgeführt worden. Er verfertigte sich eine Reihe Kreissectoren von grösserem, eine andere von kleinerem Radius, welche mit Pigmenten (Zinnober, hellem Chromgelb, Pariser Grün, Ultramarin,

Weiss und Schwarz) überzogen waren, und befestigte dieselben so auf einer rotirenden Scheibe, dass beliebige grössere und kleinere Stücke der einzelnen Sectoren sichtbar wurden, und zwar wurde in der Mitte der Scheibe eine andere Zusammenstellung gemacht als am Rande. Die Breite der Sectoren wurde so lange abgeändert, bis beide Farbenmischungen bei schneller Rotation der Scheibe ganz gleich erschienen, dann der Winkel bestimmt, in dem die einzelnen Sectoren sichtbar waren. So lassen sich unzählig viele Farbenzusammenstellungen machen, und das Mischungsgesetz lässt sich an ihnen prüfen. Der Sinn dieser Prüfung lässt sich unserer bisher gewählten Darstellungsweise gemäss folgendermassen deutlich machen. Man construire eine Farbentafel, in welcher drei von den Farben der Scheibe, z. B. Roth, Grün und Blau, als Grundfarben betrachtet, ihre Helligkeiten gleich der willkührlichen Maasseinheit gesetzt werden. Dann sind bei jedem Mischungsversuche aus diesen drei Farben die angewendeten Helligkeiten derselben gleich dem Bogen ihres Sectors dividirt durch die Kreisperipherie zu setzen. Zuerst wird es möglich sein, aus den drei Farben ein Grau zusammenzusetzen, und gleich zu machen einem aus Schwarz und Weiss zusammengesetzten Grau. Dadurch bestimmt sich die Stelle und Maasseinheit des Weiss in der Farbentafel. Dann wird es möglich sein, aus Roth und Grün einerseits, Gelb, Weiss und Schwarz andererseits zwei gleiche graugelbe Mischungen zu erzeugen, und dadurch nach der oben gegebenen Constructionsregel den Ort und die Maasseinheit des Gelb in der Farbentafel zu bestimmen. Sobald dies geschehen ist, lässt sich durch Construction in der Farbentafel oder Rechnung für jede andere Mischung aus drei von den fünf Farben Roth, Gelb, Grün, Blau, Weiss vollständig berechnen, wie dieselbe aus anderen drei zusammengesetzt werden kann, und am Versuche prüfen, so dass jede solche Prüfung eine Prüfung der Principien ist, auf welche die Schwerpunktsconstructionen bei der Farbenmischung gegründet sind. Maxwell hat die Versuche in guter Uebereinstimmung mit dem Gesetze gefunden. Diese Einrichtung der Farbenscheibe würde übrigens auch sehr geeignet sein, um die Farben der Naturkörper durch Zahlen zu definiren.

Wir haben gesehen, dass alle Verschiedenartigkeit des Lichteindrucks als die Function dreier unabhängig veränderlicher Grössen betrachtet werden kann, und haben bisher als diese drei Veränderlichen 1) die Lichtstärke, 2) den Farbenton und 3) die Sättigung gewählt oder 1) die Quantität Weiss, 2) die Quantität 3) die Wellenlänge einer Spectralfarbe. Statt dieser drei Variablen kann man aber auch andere drei einführen, und dies ist geschehen, indem man versucht hat, alle Farben als Mischungen von veränderlichen Quantitäten dreier Farben, der sogenannten drei Grundfarben zu betrachten, zu welchen man meistens Roth, Gelb und Blau wählte. Wenn man diese Lehre objectiv auffassen wollte, d. h. behaupten, es gäbe im Spectrum einfache Farben, durch deren Zusammensetzung man einen gleichen Eindruck auf das Auge hervorbringen kann, wie durch jedes beliebige andere einfache oder zusammengesetzte Licht, so wäre dies unrichtig. Es giebt keine solche drei einfachen Farben, durch deren Zusammensetzung man auch nur erträglich die zwischenliegenden Farben des Spectrum nachbilden könnte, welche immer viel gesättigter erscheinen, als die

zusammengesetzten Farben. Am wenigsten passen dazu Roth, Gelb und Blau, denn wenn man als Blau eine dem Farbentone des Himmels ähnliche Farbe wählt, und nicht ein dem Grünlichen sich näherndes Blau, so kann man durch Mischung dieser Farben gar kein Grün erhalten; nimmt man ein grünliches Gelb und ein grünliches Blau, so erhält man nur ein sehr weissliches Grün. Diese drei Farben konnten nur so lange gewählt werden, als man, auf die Mischung der Pigmentfarben vertrauend, fälschlich meinte, gelbes und blaues Licht gemischt gebe Grün. Etwas besser würde es gehen, wenn man als Grundfarben Violett, Grün und Roth wählte. Aus Violett und Grün kann man Blau mischen, aber freilich nicht das gesättigte Blau des Spectrum, und aus Grün und Roth kann man ein mattes Gelb zusammensetzen, was sich aber ebenfalls auf den ersten Blick von dem glänzenden Gelb des Spectrum unterscheidet.

Denken wir uns die Farben nach der oben geschilderten Methode in eine Farbentafel eingetragen, so ist aus der dort gegebenen Constructionsregel klar, dass alle Farben, welche aus drei gegebenen zu mischen sind, in dem Dreieck liegen müssen, dessen Ecken mit dem Orte der drei Grundfarben in der Farbentafel zusammenfallen. So würde in dem nebenstehenden Farbenkreise *Fig. 118*, in welchem die Farben durch ihre Anfangsbuchstaben bezeichnet sind (I = Indigblau, C = Cyanblau), das Dreieck *RCG* alle Farben umfassen, welche aus Roth, Cyanblau und Gelb zusammenzusetzen sind. Dabei fallen wie man sieht zwei grosse Stücke des Kreises weg, es würde nur sehr weissliches Violett und sehr weissliches Grün herzustellen sein. Wählten wir aber statt Cyanblau die Farbe des blauen Himmels, das Indigblau, so würde das Grün ganz wegfallen. Das Dreieck *VRGr* enthält die aus Violett, Roth, Grün mischbaren Farben, und würde schon eine grössere Zahl der vorhandenen Farben vertreten. Aber wie man in der Figur sieht, fehlen noch immer beträchtliche Segmente des Kreises, übereinstimmend mit den angeführten Erfahrungen über Mischung von Spectralfarben, aus denen eben folgt, dass die Grenzcurve der Farbentafel eine von den Seiten des Dreiecks beträchtlich abweichende krumme Linie sein müsse.

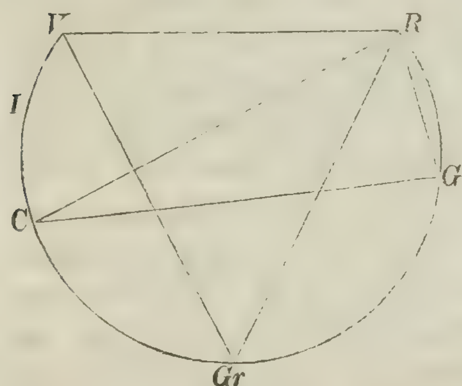


Fig. 118.

Die objective Natur dreier Grundfarben hat BREWSTER zu vertheidigen gesucht, indem er behauptete, für jeden Grad der Brechbarkeit der Lichtstrahlen existirten drei verschiedene Arten Licht, rothes, gelbes und blaues, welches nur in verschiedenen Verhältnissen gemischt sei, so dass dadurch die verschiedenen Farben des Spectrum entständen. Die Spectralfarben seien also noch zusammengesetzt aus dreierlei qualitativ verschiedenen Lichtarten, deren Strahlen aber für jede einzelne einfache Farbe denselben Grad von Brechbarkeit hätten. Durch absorbirende farbige Medien sollte sich nach BREWSTER Licht aller drei Grundfarben in den verschiedenen einfachen Farben nachweisen lassen. Dass diese letztere Behauptung, auf welcher seine ganze Beweisführung beruht, nicht richtig sei, ist schon im vorigen Paragraphen besprochen.

Wenn wir von Brewster's Hypothese absehen, hat es überhaupt keinen Sinn, in objectiver Bedeutung von drei Grundfarben zu sprechen. Denn so lange es auf rein physikalische Verhältnisse ankommt und das menschliche Auge aus dem Spiele bleibt, sind die Eigenschaften des gemischten Lichts immer nur abhängig von den Mengenverhältnissen, in denen das Licht sämmtlicher einzelner Wellenlängen darin vorkommt. Eine Reduction der Farben auf drei Grundfarben kann immer nur subjective Bedeutung haben, es kann sich nur darum handeln, die Farbenempfindungen auf drei Grundempfindungen zurückzuführen. In diesem Sinne hat Th. Young das Problem richtig aufgefasst, und in der That giebt seine Annahme eine ausserordentlich einfache und klare Uebersicht und Erklärung sämmtlicher Erscheinungen der physiologischen Farbenlehre. Th. Young nimmt an:

1) Es giebt im Auge drei Arten von Nervenfasern. Reizung der ersten erregt die Empfindung des Roth, Reizung der zweiten die des Grün, Reizung der dritten die Empfindung des Violett.

2) Objectives homogenes Licht erregt diese drei Arten von Fasern je nach seiner Wellenlänge in verschiedener Stärke. Die rothempfindenden Fasern werden am stärksten erregt von dem Lichte grösster Wellenlänge, die grünempfindenden von dem Lichte mittlerer Wellenlänge, die violettempfindenden von dem Lichte kleinster Wellenlänge. Indessen ist dabei nicht ausgeschlossen, muss vielmehr zur Erklärung einer Reihe von Erscheinungen angenommen werden, dass jede Spectralfarbe alle Arten von Fasern erregt, aber die einen schwach die anderen stark. Denken wir uns in *Fig. 119* in horizontaler Richtung die Spectralfarben in ihrer natürlichen Reihenfolge aufgetragen, anfangend von Roth *R* bis zum Violett *V*, so können die drei Curven etwa die Erregungsstärke der drei Arten von Fasern darstellen, No. 1 die der rothempfindenden, No. 2 der grünempfindenden, No. 3 der violettempfindenden.

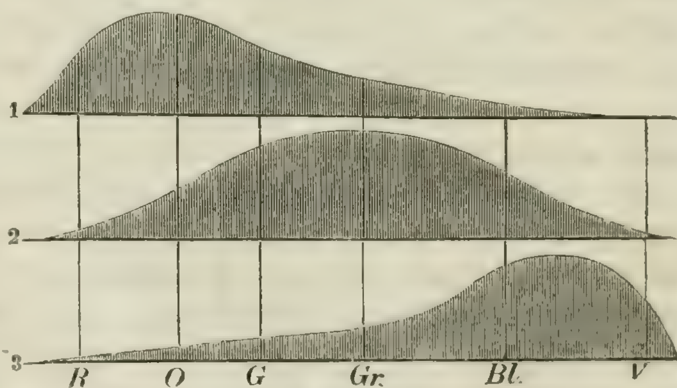


Fig. 119.

Das einfache Roth erregt stark die rothempfindenden, schwach die beiden andern Faserarten; Empfindung: roth.

Das einfache Gelb erregt mässig stark die roth- und grünempfindenden, schwach die violetten; Empfindung: gelb.

Das einfache Grün erregt stark die grünempfindenden, viel schwächer die beiden anderen Arten; Empfindung: grün.

Das einfache Blau erregt mässig stark die grün- und violettempfindenden, schwach die rothen; Empfindung: blau.

Das einfache Violett erregt stark die gleichnamigen, schwach die anderen Fasern; Empfindung: violett.

Erregung aller Fasern von ziemlich gleicher Stärke giebt die Empfindung von Weiss oder weisslichen Farben.

Vielleicht nimmt bei dieser Hypothese zunächst mancher daran Anstoss, dass die Zahl der vorauszusetzenden Nervenfasern und Nervenendigungen verdreifacht werden muss, im Vergleich mit der gewöhnlichen Annahme, wo man jede einzelne Nervenfaser alle möglichen Farbenerregungen leiten lässt. Ich glaube aber nicht, dass in dieser Beziehung die Annahme von Young mit den anatomischen Thatsachen in Widerspruch steht; da wir über die Zahl der leitenden Fasern nichts wissen, und noch eine Menge mikroskopischer Elemente (Zellen, Körner, Stäbchen) vorhanden sind, denen wir bisher keine specielle Function anweisen konnten. Andererseits ist dies auch nicht das Wesentliche der Hypothese von Young. Das scheint mir vielmehr darin zu liegen, dass die Farbenempfindungen vorgestellt werden, als zusammengesetzt aus drei von einander vollständig unabhängigen Vorgängen in der Nervensubstanz. Diese Unabhängigkeit zeigt sich nicht nur bei den hier vorliegenden Erscheinungen, sondern auch bei denen der Ermüdung des Sehnervenapparates. Es würde nicht gerade nöthig sein, verschiedene Nervenfasern für diese verschiedenen Empfindungen anzunehmen. Man würde dieselben Vortheile, welche die Hypothese von Young für die Erklärungen bietet, gewinnen, wenn man die Annahme machte, dass innerhalb jeder einzelnen Faser dreierlei von einander verschiedene und von einander unabhängige Thätigkeiten auftreten könnten. Da aber die ursprüngliche von Young aufgestellte Form dieser Hypothese eine grössere Bestimmtheit der Vorstellung und des Ausdrucks giebt, als eine solche Modification derselben erlauben würde, so wollen wir sie, wenn auch nur im Interesse der Darstellung, in ihrer ursprünglichen handgreiflicheren Gestalt beibehalten. Es kommt noch hinzu, dass die physikalischen Erscheinungen der Nervenerregung, nämlich die elektromotorischen, uns in sensiblen wie in motorischen Nerven nichts von einer solchen Verschiedenartigkeit der Thätigkeit merken lassen, wie sie vorhanden sein muss, wenn jede Sehnervenfaser sämmtliche Farbenempfindungen leiten soll. Durch Young's Hypothese wird es möglich, auch in dieser Beziehung die einfachen Vorstellungen über den Mechanismus der Reizung und ihre Fortleitung, die wir uns zunächst durch das Studium der Phänomene an den motorischen Fasern gebildet haben, direct auf den Sehnerven zu übertragen, was nicht anginge, wenn wir uns vorstellten, dass jede Sehnervenfaser in drei qualitativ verschiedene Reizungszustände solle gerathen können, die sich gegenseitig nicht störten. Young's Hypothese ist nur eine speciellere Durchführung des Gesetzes von den specifischen Sinnesenergien. Wie Tastempfindung und Gesichtsempfindung des Auges nachweislich verschiedenen Nervenfasern zukommt, wird hier dasselbe auch für die Empfindung der verschiedenen Grundfarben angenommen.

Die Wahl der drei Grundfarben hat zunächst etwas Willkührliches. Es könnten beliebig jede drei Farben gewählt werden, aus denen Weiss zusammengesetzt werden kann. Young ist wohl durch die Rücksicht geleitet worden,

dass die Endfarben des Spectrum eine ausgezeichnete Stellung zu beanspruchen scheinen. Würden wir diese nicht wählen, so müsste eine der Grundfarben ein purpurner Farbenton sein, und die ihr entsprechende Curve in *Fig. 119* zwei Maxima haben, eines im Roth, eines im Violett. Es wäre dies eine complicirtere, aber nicht unmögliche Voraussetzung. So viel ich sehe, giebt es bisher kein anderes Mittel, eine der Grundfarben zu bestimmen, als die Untersuchung der Farbenblinden. In wie weit diese YOUNG's Hypothese wenigstens für das Roth bestätigt, wird sich später zeigen.

Dass die den drei Grundfarben entsprechenden Spectralfarben nicht blos die gleichnamigen Nervenfasern erregen, sondern in geringerem Maasse auch die anderen, beweisen für das Grün wenigstens schon die Ergebnisse der Farbenmischung. Denn denken wir uns alle aus den drei Grundfarben zusammengesetzten Farbenempfindungen nach der NEWTON'schen Regel in der Ebene geordnet, so wird die Farbenfläche, wie aus dem früher Gesagten folgt, ein Dreieck sein. Dieses Dreieck muss die in *Fig. 117* dargestellte Farbenfläche, welche alle aus Spectralfarben mischbaren Farben umfasst, in sich schliessen. Es würde dies geschehen können, wenn wir, wie in *Fig. 120*, die Empfindung des reinen Grün nach A hin verlegten, übrigens das spectrale Roth und Violett R und V als reine Grundfarben voraussetzten. Dann wäre $A\,VR$ das Farbendreieck, welches alle möglichen Farbenempfindungen in sich schlösse. Es würde, wie gesagt, diese Annahme den Thatsachen der Farbenmischung genügen. Andererseits aber machen einige später zu erwähnende Thatsachen, nämlich die der Farbenblindheit, der Aenderung des Farbentons durch vermehrte Intensität des Lichts, der Nachbilder die Annahme nothwendig, dass auch das spectrale Roth und Violett nicht einer einfachen Empfindung einer Grundfarbe entsprechen, sondern einer schwach gemischten Empfindung. Wir würden also die Orte des spectralen Roth und Violett in dem Farbendreieck *Fig. 120* etwa nach $R_{\prime}$ und $V_{\prime}$ zu verlegen haben, und $ICGR_{\prime}V_{\prime}$ würde dann die ganze Menge der möglichen Farben des objectiven Lichtes umfassen.

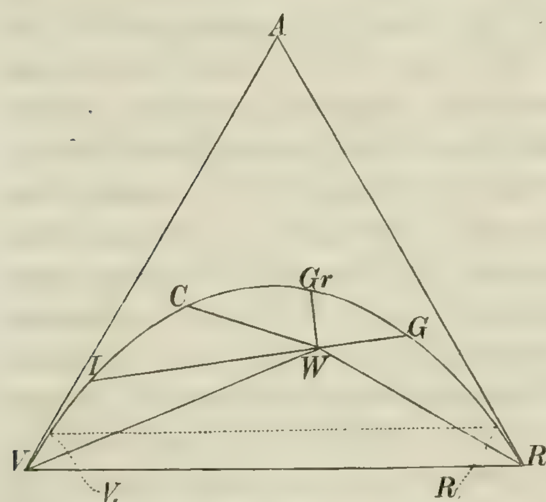


Fig. 120.

Es folgt nun hieraus, dass es noch eine Reihe von gesättigteren Farbenempfindungen geben müsse, als diejenigen sind, welche beim gewöhnlichen Zustande des Auges durch objectives Licht, selbst durch das des Spectrum, hervorgerufen werden. In der *Fig. 120* sind die durch äusseres Licht im normalen Auge hervorgerufenen Farben umschlossen durch die Curve und die gerade Linie $V_{\prime}\,R_{\prime}$, der Rest des Dreiecks entspricht Farbenempfindungen, die nicht unmittelbar durch äusseres Licht erzeugt werden können. Da die letzteren alle weiter vom Weiss abstehen als die Spectralfarben, so müssen sie gesättigter sein als selbst letztere, welche die gesättigtesten objectiven Farben sind, die

wir kennen. Und in der That werden wir in der Lehre von den Nachbildern durch Ermüdung des Auges für die Complementärfarbe dergleichen Farbenempfindungen erzeugen lernen, gegen welche die Spectralfarben weisslich erscheinen.

Die oben angeführte Thatsache, dass die verschiedenen Spectralfarben einen verschiedenen Grad von Farbensättigung zeigen, erklärt sich leicht aus dieser Theorie.

Von grossem Interesse für die Theorie der Farbenempfindungen sind die Wahrnehmungen solcher Augen, welche weniger Farben als die gewöhnlichen Augen unterscheiden (Farbenblindheit, *Achromatopsia, Achrupsia*). A. Seebeck hat nachgewiesen, dass es zwei Klassen von Farbenblinden giebt. Innerhalb jeder dieser Klassen machen die einzelnen Augen dieselben Verwechselungen zwischen verschiedenen Farben, und man findet nur Unterschiede der Stärke in ihrem Uebel. Dagegen erkennt jede Klasse die meisten Verwechselungen, welche Individuen der anderen Klasse gemacht haben.

Am häufigsten scheinen, namentlich in England, die Fälle von Seebeck's zweiter Klasse zu sein, deren Uebel auch oft nach dem bekannten Chemiker J. Dalton, der zu ihnen gehörte und zuerst eine genauere Untersuchung dieses Zustandes gab, Daltonismus (*Anerythropsia* nach Goethe) genannt wird. Da die englischen Naturforscher gegen diese Art, den Namen ihres berühmten Landsmanns durch einen seiner Fehler zu verewigen, Einsprache erheben, wollen wir den Zustand Rothblindheit nennen. Individuen, bei denen dieser Zustand vollständig entwickelt ist, sehen im Spectrum nur zwei Farben, die sie meist Blau und Gelb nennen. Zum letzteren rechnen sie das ganze Roth, Orange, Gelb und Grün. Die grünblauen Töne nennen sie grau, den Rest blau. Das äusserste Roth, wenn es lichtschwach ist, sehen sie gar nicht, wohl aber wenn es intensiv ist. Sie zeigen deshalb die rothe Grenze des Spectrum gewöhnlich an einer Stelle an, wo die normalen Augen noch deutlich schwaches Roth sehen. Unter den Körperfarben verwechseln sie das Roth (d. h. Zinnoberroth und röthlich Orange) mit Braun und Grün, wobei dem normalen Auge im Allgemeinen die verwechselten rothen Farbentöne viel heller erscheinen, als die braunen und grünen; Goldgelb unterscheiden sie nicht von Gelb, Rosaroth nicht von Blau. Alle Mischungen verschiedener Farben dagegen, welche dem normalen Auge gleich erscheinen, erscheinen auch den Rothblinden gleich. Schon J. Herschel [1] stellt in Bezug auf Dalton's Fall die Ansicht auf, dass alle Farben, welche er unterschiede, aus zwei statt aus drei Grundfarben zusammengesetzt gedacht werden könnten. Diese Meinung ist nun neuerdings durch Maxwell mittels seiner Methode, die Farbenmischungen auf dem Farbenkreisel zur Messung zu benutzen, bestätigt worden. Für das gesunde Auge lässt sich, wie wir sahen, zwischen jeder vorkommenden Farbe, drei passend gewählten Grundfarben, ferner Weiss und Schwarz eine Farbengleichung herstellen. Bei den Rothblinden braucht man, wovon ich mich selbst überzeugt habe, ausser Weiss und Schwarz nur zwei Farben (z. B. Gelb und Blau), um mit jeder

[1] In einem Briefe, der angeführt ist in G. Wilson *on Colour Blindness.* Edinburgh 1855. p. 60.

anderen Farbe die Farbengleichung auf der rotirenden Scheibe herzustellen. Ich benutzte bei meinen Versuchen mit Herrn M., Schüler der polytechnischen Schule, der an physikalische Untersuchungen gewöhnt war, und sich ziemlich empfindlich gegen die Farbenunterschiede zeigte, die für sein Auge noch vorhanden waren, als Hauptfarben Chromgelb und Ultramarin.

Mit Roth (etwa dem des Siegellacks) war ihm identisch eine Mischung von 35° Gelb 325° Schwarz, die für das normale Auge ein dunkles Olivengrün gab.

Mit Grün identisch (im Farbenton etwa der Linie *E* entsprechend) ergiebt sich aus den Versuchen eine Mischung von 327° Gelb 33° Blau, für das normale Auge Graugelb. Mit Grau identisch 165° Gelb und 195° Blau, für das normale Auge ein schwach röthliches Grau.

Da man nun aus Roth, Gelb, Grün, Blau alle anderen Farbentöne würde mischen können, so ergiebt sich, dass für Herrn M. alle aus Gelb und Blau gemischt werden könnten.

Aus Grasmann's Sätzen über Farbenmischung folgt übrigens unmittelbar, wenn man sie auf ein Auge anwendet, welches Roth mit Grün verwechselt, dass die Farbentöne, welche es überhaupt unterscheidet, alle aus zwei anderen Farben, etwa Gelb und Blau, zu mischen seien. Denn wenn Roth und Grün identisch erscheinen, müssen auch nothwendig alle Mischfarben aus Roth und Grün identisch erscheinen. Da gleich aussehende Farben gemischt gleich aussehende Mischfarben geben, muss ferner jede Mischung einer bestimmten Quantität Gelb mit einer solchen Quantität irgend einer der Mischfarben aus Roth und Grün, die für das farbenblinde Auge gleiches Aussehen hat, für dieses Auge gleich aussehende Mischfarben geben. Eine der Mischfarben aus Roth und Grün ist aber für das gesunde Auge auch durch Gelb und Blau herzustellen, und kann daher für das farbenblinde Auge statt sämmtlicher Mischfarben aus Roth und Grün substituirt werden. Daraus folgt, dass sämmtliche Mischfarben aus Gelb, Roth und Grün für das letztere Auge auch aus Gelb und Blau herzustellen sind, und dasselbe lässt sich ebenso für sämmtliche Mischungen aus Blau, Roth und Grün beweisen. Da endlich aus Roth, Gelb, Grün, Blau sämmtliche Farbentöne für das gesunde Auge mischbar sind, sind es für das farbenblinde alle Farbentöne aus Gelb und Blau.

Sind die Farben in der Ebene nach den Principien der Schwerpunktsconstruction geordnet, so müssen alle solche Farben, welche den Farbenblinden bei passender Lichtstärke gleich erscheinen, in einer geraden Linie liegen, da auf der Verbindungslinie zweier Farben ihre Mischfarben liegen, und diese von gleichem Farbenton erscheinen müssen, wenn die ursprünglichen Farben gleich aussehen. Ferner lässt sich zeigen, dass alle diese geraden Linien entweder parallel sind, oder sich in einem Punkte schneiden, und dass die diesem Schneidepunkte angehörige Farbe dem farbenblinden Auge unsichtbar sein muss.

Es erscheine dem Farbenlinden die Quantität r der in *R Fig. 121* (Seite 296) befindlichen Farbe gleich der Quantität g der in G befindlichen. Nun ist

$$r = nr + (1 - n) r.$$

Mit der Menge nr der Farbe R ist gleich aussehend die Menge ng der Farbe G,

also wenn n ein ächter Bruch, ist gleich aussehend die Menge r der Farbe R mit der Mischung $(1-n)r$ von R und ng von G. In der Farbenfläche ist diese Mischfarbe zu finden im Punkte S der Linie RG, wenn

$$RS : SG = ng : (1-n)r \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

und die Quantität s der so gewonnenen Mischfarbe ist

$$s = ng + (1-n)r.$$

Das Aussehen dieser Quantität s von der Farbe S ist für das farbenblinde Auge unabhängig von dem Werthe von n.

Wenn wir nun die Quantität b der Farbe B mit der Quantität s der Farbe S mischen, so erhalten wir eine Mischfarbe, deren Aussehen für das farbenblinde Auge unabhängig von der veränderlichen Grösse n ist. Der Ort der Farbe sei T, ihre Menge t, so ist

Fig. 121.

$$t = b + s = b + ng + (1-n)r$$

$$TS : BT = b : s = b : [ng + (1-n)r] \quad \ldots\ldots \quad 1\text{a}).$$

Fällen wir aus B das Loth BH auf RG und aus T das Loth TL auf BH, nennen wir

$$LH = x \qquad BH = h$$
$$TL = y \qquad HG = a$$
$$RG = c$$

so ist nach 1 a)

$$\frac{x}{h} = \frac{LH}{BH} = \frac{TS}{BS} = \frac{b}{b + ng + (1-n)r} \quad \ldots\ldots \quad 1\text{b})$$

$$\frac{y}{h-x} = \frac{TL}{BL} = \frac{SH}{BH} = \frac{SG-a}{h}.$$

Nun folgt aus 1)

$$SG = c \cdot \frac{(1-n)r}{ng + (1-n)r},$$

also

$$\frac{y}{h-x} = \frac{(c-a)(1-n)r - ang}{h[ng + (1-n)r]} \quad \ldots\ldots \quad 1\text{c}).$$

Wenn man aus 1_b und 1_c die veränderliche Grösse n eliminirt, erhält man eine Gleichung zwischen den rechtwinkeligen Coordinaten des Punktes T, nämlich

$$0 = ybh(g-r) - x[crg + br(c-a) + abg] + bh[(c-a)r + ag] \quad 1\text{d}).$$

Da dies eine lineare Gleichung zwischen den rechtwinkeligen Coordinaten x und y ist, so liegen die betreffenden Orte T der für das farbenblinde Auge gleichaussehenden Mischfarben in einer geraden Linie. Es sei TQ diese gerade Linie, Q ihr Schneidepunkt mit der Richtung RG, so ist $QH = y_0$ der Werth, welchen y annimmt, wenn man $x = 0$ setzt

$$y_0 = \frac{(c-a)r + ag}{r-g} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\text{e}).$$

Dieser Werth von y_0 ist unabhängig von der Quantität b der zugemischten Farbe B, also schneiden sich alle geraden Linien, welche gleich aussehende Mischfarben

von R, G und B enthalten, in demselben Punkte Q, oder sind sich parallel, wenn $r = g$ und also y_0 unendlich.

Die Entfernung des Schneidepunktes Q vom Punkte R ist

$$y_0 - c + a = \frac{cg}{r - g} = QR \quad \ldots \ldots \quad 1\,f).$$

Mischen wir eine Quantität q der Farbe Q mit der Quantität g der Farbe G, so dass die Farbe R entsteht, so muss sein

$$\frac{QR}{RG} = \frac{g}{q}$$

oder nach 1_f da $RG = c$

$$\frac{g}{r-g} = \frac{g}{q}$$

$$q = r - g.$$

Die Quantität der Mischfarbe R wird dann

$$r = g + q.$$

Da nun r nach der Voraussetzung dem farbenblinden Auge gleichaussehend ist mit g, die Quantität $q = r - g$ aber im Allgemeinen nicht Null ist, so folgt daraus, dass das farbenblinde Auge die Farbe Q gar nicht empfinden kann.

Der Schneidepunkt der geraden Linien, welche die gleichaussehenden Farben enthalten, fällt also in den Ort der Farbe, welche dem farbenblinden Auge fehlt.

In der Young'schen Hypothese kann die dem farbenblinden Auge unsichtbare Farbe natürlich nur eine der Grundfarben sein, denn wenn alle Grundfarben empfunden werden, kann keine andere Farbe, die ja aus den Grundfarben nur zusammengesetzt ist, fehlen. Wenn man nun diejenigen Farben aufsucht, welche dem Weiss (beziehlich Grau) gleich erscheinen, so werden dies Farben sein, die für das gesunde Auge entweder Farben vom Farbentone der fehlenden Grundfarbe oder von ihrer Complementärfarbe sind, in verschiedenen Graden mit Weiss gemischt. Denn alle diese dem Weiss gleich aussehenden Farben müssen auf einer geraden Linie liegen. Jede gerade Linie aber, die in der Farbenfläche durch den Ort des Weiss gezogen ist, enthält in jeder ihrer beiden Hälfte Farben von gleichem Farbentone und verschiedenen Graden der Sättigung. Die Farben der einen Hälfte sind aber denen der anderen complementär. Jede solche Linie, welche gleich aussehende Farben enthält, muss aber auch, wie eben bewiesen, durch den Ort der fehlenden Grundfarbe gehen, folglich in ihrer einen Hälfte die Farben vom gleichen Farbentone mit der Grundfarbe enthalten. Bei den Versuchen, welche ich mit Herrn M. anstellte, zeigte sich, dass dem reinen Grau gleich erschien ein Roth, welches sehr nahe dem äussersten Roth des Spectrum im Farbentone entsprach (38° Ultramarin, 322° Zinnoberroth), vielleicht ein wenig nach der Seite des Purpur abwich, und ein entsprechendes complementäres Blaugrün (59° Ultramarin, 301° Parisergrün). Maxwell hat ähnlich gefunden für das Roth 6° Ultramarin, 94° Zinnober, für das Grün 40 Ultramarin, 60 Parisergrün. Da nun ausserdem das Roth bei gleicher Helligkeit für normale Augen viel dunkler erschien, als das Grau und Grün, so kann kein Zweifel bleiben, dass das Roth und nicht das Grün der fehlenden Farbe

entspricht. Die Rothblindheit würde also nach YOUNG's Hypothese für eine Lähmung der rothempfindenden Nerven zu erklären sein.

Wenn nun wirklich ein dem äussersten Roth des Spectrum nahe stehendes Roth die eine Grundfarbe ist, so können die beiden anderen wenigstens nicht bedeutend von dem von YOUNG gewählten Grün und Violett abweichen.

Daraus würde nun folgen, das die Rothblinden nur Grün, Violett und ihre Mischung das Blau empfinden. Das spectrale Roth, welches nur schwach die grünempfindenden, fast gar nicht die violettempfindenden Nerven zu erregen scheint, müsste ihnen danach als gesättigtes, lichtschwaches Grün erscheinen, und zwar gesättigter als uns das wirkliche Grün des Spectrum erscheint, dem schon merkliche Mengen der anderen Farben beigemischt sein müssen. Lichtschwaches Roth, welches die rothempfindenden Nerven der normalen Augen noch genügend erregt, erregt dagegen ihre grünempfindenden Nerven nicht mehr genügend, und erscheint ihnen deshalb schwarz.

Spectrales Gelb wird als lichtstarkes gesättigtes Grün erscheinen, und da es eben die lichtstärkere und gesättigte Abstufung dieser Farbe bildet, erscheint es erklärlich, dass danach die Rothblinden den Namen der Farbe wählen, und alle diese eigentlich grünen Töne Gelb nennen.

Grün wird schon im Vergleich zu den vorigen eine Einmischung von der anderen Grundfarbe zeigen, also eine zwar lichtstärkere aber weissliche Abstufung derselben Farbe sein wie Roth und Gelb. Die grösste Lichtintensität des Spectrum erscheint den Rothblinden nach den Beobachtungen von SEEBECK auch nicht wie normalen Augen im Gelb, sondern im Grünblau. In der That wenn die Erregung der grünempfindenden Nerven, wie wir voraussetzen müssen, im Grün am stärksten ist, wird für die Rothblinden das Maximum der gesammten Erregung etwas nach der Seite des Blau fallen, weil hier die Erregung der violettempfindenden Nerven steigt. Weiss im Sinne der Rothblinden ist natürlich eine Mischung ihrer beiden Grundfarben in einem bestimmten Verhältniss, welche uns grünblau erscheint, daher sie denn auch die Uebergangsstufen im Spectrum von Grün zu Blau für graue Farben erklären.

Weiter im Spectrum gewinnt die zweite Grundfarbe das Uebergewicht, die sie Blau nennen, weil das Indigblau, wenn auch in ihrem Sinne noch etwas weisslich, noch durch seine Lichtstärke ihnen ein mehr in die Augen fallender Repräsentant dieser Farbe sein wird als das Violett. Sie erkennen den Unterschied im Aussehen zwischen Blau und Violett. Der von SEEBECK untersuchte H. wusste die Grenze zu zeigen, erklärte aber, er würde das Violett lieber Dunkelblau nennen. Uebrigens müssen ihnen die blauen Töne ziemlich ebenso erscheinen, wie den normalen Augen, weil hier auch für diese die Einmischung des Roth sehr klein sein wird.

Da ihnen alle diese Farben des Spectrum noch gewisse, wenn auch feinere Unterschiede zeigen müssen, ist es erklärlich, dass sie bei grösserer Aufmerksamkeit und Uebung auch wohl lernen, sehr gesättigte Farben richtig zu benennen. Bei weisslicheren Farben müssen aber die genannten Unterscheidungsmerkmale sie im Stich lassen, da können sie sich der Verwechselung nicht entziehen.

Was nun die andere Klasse der Farbenblinden, SEEBECK's erste Klasse betrifft, so liegen über diese noch keine genügende Beobachtungen vor, um ihren Zustand vollständig zu definiren. Nach SEEBECK's Angaben unterscheiden sie sich von den Rothblinden dadurch, dass sie leicht und sicher über die Uebergänge zwischen Violett und Roth urtheilen, die jenen gleichmässig als Blau erscheinen. Dagegen machen sie auch Verwechselungen, zwischen Grün, Gelb, Blau und Roth. Wenn beide Klassen denselben Farbenton mit Grün verwechseln, so wählen die Individuen dieser Klasse ein gelberes Grün als die Rothblinden. Sie zeigen keine Unempfindlichkeit gegen das äusserste Roth, und verlegen die grösste Helligkeit des Spectrum in das Gelb. Auch sie unterscheiden nur zwei Farbentöne im Spectrum, die sie (wahrscheinlich ziemlich richtig) Blau und Roth nennen. Danach kann man vermuthen, dass ihr Uebel in einer Unempfindlichkeit der grünempfindenden Nerven besteht, worüber aber weitere Untersuchungen wünschenswerth sind.

Ausser der gänzlichen Unempfindlichkeit können natürlich auch noch alle möglichen Grade verminderter Empfindlichkeit der einen oder anderen Nerven vorkommen, und zu verschiedenen Graden der Unfähigkeit, Farben zu unterscheiden, Veranlassung geben. WILSON und TYNDALL haben auch Fälle berichtet, wo das Uebel nicht angeboren war, sondern plötzlich eintrat, nach schweren Kopfverletzungen und Anstrengungen des Auges.

Was die Untersuchung Farbenblinder betrifft, so wird durch Fragen, wie sie diese oder jene Farbe nennen, natürlich nur ausserordentlich wenig ermittelt werden, denn die Farbenblinden befinden sich in der Lage, das System von Namen, welches für die Empfindungen des normalen Auges zurecht gemacht ist, auf ihre Empfindungen anwenden zu müssen, für die es nicht passt. Es passt nicht nur nicht, weil es zu viele Namen für Farbentöne enthält, sondern in der Reihe der Spectralfarben bezeichnen wir Unterschiede als solche des Farbentons, die für die Farbenblinden nur Unterschiede der Sättigung oder der Lichtstärke sind. Ob das, was sie Gelb und Blau nennen, unserem Gelb und Blau entspricht, ist mehr als zweifelhaft. Deshalb erfolgen ihre Antworten auf Fragen über Farben meist langsam und verlegen, und erscheinen uns verwirrt und widersprechend.

Viel besser, aber doch noch sehr unzureichend ist die Methode von SEEBECK, den Farbenblinden eine Auswahl gefärbter Papiere oder Proben von Stickwolle zu geben mit der Aufforderung, sie nach ihrer Aehnlichkeit zusammen zu ordnen. Aber die Anzahl der Farbenproben müsste ungeheuer gross sein, wenn darin die charakteristisch verwechselten Farbentöne auch genau gerade in der nöthigen Vermischung mit Weiss, und der nöthigen Helligkeit vorkommen sollen, dass die vollständige Gleichheit für das farbenblinde Auge erzielt wird. So lange aber nur Aehnlichkeit da ist, wird man sich schwer darüber verständigen, ob die Differenz eine des Farbentons, oder der Sättigung, oder der Helligkeit ist. Man wird also nur durch Zufall einige wenige bestimmte Resultate erhalten können.

Dagegen erlaubt der nach MAXWELL's Methode eingerichtete Farbenkreisel schnell die nothwendigen Data mit grosser Genauigkeit zu erhalten, weil man sehr leicht eine Reihe von Farben durch Mischung erzeugen kann, die dem farbenblinden Auge *vollkommen* gleich erscheinen. Dabei ist die Hauptsache, die den Grundcharakter des Uebels bezeichnet, zu ermitteln, welche zwei Farben mit reinem Grau, wie man es durch die Mischung von Weiss und Schwarz auf dem Kreisel erhält, verwechselt werden. Eine davon, die dann dem farbenblinden Auge ver-

hältnissmässig viel dunkler als dem normalen erscheint, ist die fehlende Grundfarbe. Dabei wird sich auch leicht ermitteln lassen, ob noch ein gewisser Rest von Empfindlichkeit für die fehlende Grundfarbe vorhanden ist, oder nicht.

Will man die hier auseinander gesetzte Theorie prüfen, so muss man ferner bestimmen, ob jede gegebene Farbe, namentlich die Hauptfarben des Spectrum, für den Farbenblinden aus zwei passend gewählten Farben zusammengesetzt werden könne.

G. Wilson hat namentlich darauf aufmerksam gemacht, wie gefährlich die Farbenblindheit auf Schiffen und Eisenbahnzügen werden könne, wo es darauf ankommt, farbige Signale zu erkennen. Er fand im Durchschnitt einen Farbenblinden unter 17,7 Personen.

Schliesslich muss noch erwähnt werden, dass Farben vom Auge nur dann unterschieden werden, wenn sie ein Feld von gewisser Ausdehnung bedecken, und eine gewisse Menge farbigen Lichts in das Auge fällt. Je weiter das farbige Feld nach den Grenzen des Gesichtsfeldes und der Netzhaut hin liegt, desto grösser muss es sein, damit seine Farbe noch erkannt werden könne. Ist das farbige Feld zu klein, so erscheint es auf hellerem Grunde grau oder schwarz, auf dunklerem Grunde grau oder weiss. Indessen kann auch die Farbe von unendlich kleinen Feldern erkannt werden, wenn die Menge des Lichts, die sie aussenden, endlich ist, wie z. B. bei den Fixsternen, deren Farben wir unterscheiden. Nach den Versuchen von Aubert [1] erschien ein Quadrat von 1 Millimeter Seite, wenn es blau auf weissem Grunde war, in 10 Fuss Entfernung schwarz, ebenso ein rothes in 20 Fuss Entfernung. Ein gelbes und grünes verschwammen schon in 12 Fuss vollständig mit dem weissen Grunde. Auf schwarzem Grunde dagegen erschienen das grüne und gelbe Quadratmillimeter in 16 Fuss Entfernung als graue Punkte, das rothe bei 12 Fuss. Blau erschien blau, wenn es überhaupt gesehen wurde.

Nach demselben Beobachter verschwindet die Farbe von farbigen Quadraten in 200 Millimeter Entfernung im Mittel unter folgenden Abweichungswinkeln von der Gesichtslinie:

	Roth.				Blau.				Gelb.				Grün.			
Seite des Quadrats	1.	2.	4.	8.	1.	2.	4.	8.	1.	2.	4.	8.	1.	2.	4.	8.
Weisser Grund	16°	19°	26°	37°	15°	22°	36°	49°	21°	31°	44°		20°	36°	44°	50°
Schwarzer Grund	30	32	42	53	36	48	54	72	30	32	49	47°	24	27	35	45
Mittel	23	26	34	45	26	35	45	61	26	32	42		22	32	40	47

Dabei ist zu bemerken, dass der Farbenton desto eher verschwindet, je stärker die Verschiedenheit der Helligkeit von der des Grundes ist, woher die Unterschiede zwischen den Resultaten auf weissem und schwarzem Grunde rühren. Das Blau war die dunkelste der von Aubert benutzten Farben.

Ehe die Farben ganz verschwinden, erleiden sie noch eine ähnliche Aenderung des Farbentons, wie bei der Vermehrung ihrer Intensität. Roth und Grün werden nämlich sehr deutlich Gelb, Blau scheint direct in Grauweiss überzugehen, und in den Mischungen aus Blau und Roth, dem Purpur, überwiegt an den

[1] Archiv für Ophthalmologie. Bd. III. Abth. II. S. 60.

Grenzen des Gesichtsfeldes das Blau. So erklärte schon PURKINJE, dass Purpur an der äussersten Grenze blau erscheine, wenn es weiter in das Gesichtsfeld hineinrückt, violett werde, endlich seine eigentliche Farbe erhalte. Ich selbst sehe ebenfalls Rosaroth an den Grenzen als bläuliches oder violettes Weiss. Am auffallendsten ist die zuletzt erwähnte Erscheinung bei Mischungen aus je zwei einfachen Farben. Wenn man z. B. nach der weiter unten zu beschreibenden Methode ein kleines farbiges Feld mit einfachem Roth und Grünblau so beleuchtet, dass es im directen Sehen weiss erscheint, so erscheint es indirect gesehen schon in geringer Entfernung vom Fixationspunkte grünblau. Es scheint nach diesen Versuchen, dass die Netzhaut am Rande gegen blaues und grünes Licht empfindlicher ist als gegen rothes. Sie nähert sich dort einigermassen dem Zustande der Rothblindheit.

Dahin gehört auch wohl der Versuch von OPPEL [1], wonach ein orangegelber Fleck auf blauem Grunde aus der Ferne heller erschien als der Grund, in der Nähe gesehen, wo das Blau mehr auf die Grenze des Gesichtsfeldes fiel, dunkler.

Neben der von TH. YOUNG aufgestellten Farbentheorie sind noch die Theorien der Farbenmischung zu erwähnen, die man direct aus der Undulationstheorie des Lichtes herzuleiten versucht hat, wie dies von CHALLIS und GRAILICH geschehen ist. Namentlich hat dies der letztere in einer sehr mühsamen Arbeit auszuführen gesucht. Er untersucht die zusammengesetzte Schwingungsbewegung, welche der Aether annimmt, wenn er von zwei Wellenzügen verschiedener Schwingungsdauer erregt wird, und berechnet die Zeiten, während welcher die Aethertheilchen nach einer oder der anderen Seite aus ihrer Gleichgewichtslage entfernt sind. Diese Zeiten sind bei einer solchen zusammengesetzten Bewegung im Allgemeinen verschieden gross, während sie bei einer einfachen Farbe gleich gross sind. GRAILICH nimmt nun an, dass jede Entfernung der Aethertheilchen aus ihrer Gleichgewichtslage nach einer Seite hin denselben Farbeneindruck hervorbringe, wie diejenige einfache Farbe, bei welcher die Entfernung aus der Gleichgewichtslage ebenso lange dauert. So erregt nun nach seiner Annahme die zusammengesetzte Wellenbewegung schnell hinter einander verschiedene Farbeneindrücke im Auge, welche sich zu einer einzigen Empfindung combiniren, die im Allgemeinen einer desto weisslicheren Farbe entspricht, je verschiedenere Empfindungen nach einander wechseln. Der Eindruck des Weiss selbst soll sich zusammensetzen aus den rasch abwechselnden Eindrücken der mittleren Töne des Spectrum vom Gelblichgrün bis Orange. Da nun bei den zusammengesetzten Wellen auch Perioden vorkommen, welche ausserhalb der Grenzen des sichtbaren Spectrum liegen, so nimmt GRAILICH für diese an, dass sie den Eindruck des Purpur erzeugen.

Die Rechnungen von GRAILICH sind durchgeführt für diejenigen Intensitätsverhältnisse, welche nach FRAUNHOFER's Messungen die Farben im Flintglasspectrum haben, und stimmen, wenn man die beiden letzten Annahmen von GRAILICH zugiebt, mit meinen Versuchen über Mischung von Spectralfarben, welche ich mit Hülfe des $v$förmigen Spaltes ausgeführt habe. Aber ich muss bemerken, dass bei diesen Versuchen keineswegs die unveränderte Helligkeit der Spectralfarben bewahrt worden ist, sondern dass ich meist diejenigen Mischfarben zu erzielen gesucht habe, welche gleich weit entfernt von ihren beiden primären Farben sind.

In denjenigen Fällen nun, wo die Amplituden der beiden Farben verschieden

[1] Jahresbericht des Frankfurter Vereins. 1853 – 1854. p. 44 – 49.

gross sind, lässt sich der Erfolg nicht durch eine allgemeine Theorie vorausbestimmen, sondern nur für einzelne Zahlenbeispiele berechnen, wie es Grailich gethan hat. Man erhält dann in jedem einzelnen Beispiele durch die Rechnung eine Reihe verschiedener Farbeneindrücke, die sich einander folgen sollen, und kann daraus nur in ziemlich unbestimmter Weise die Art des Gesammteindrucks abschätzen, wenn man Grailich's Principien folgt. Schlimm für diese Theorie erscheint mir aber der Umstand, dass, wenn man gleiche Amplituden der beiden Wellenzüge annimmt, in welchem Falle sich die mathematische Theorie wirklich durchführen lässt, die Uebereinstimmung mit den Erfahrungen sehr mangelhaft wird, was Grailich selbst bemerkt hat. Ist die Wellenlänge des einen Wellenzuges $\lambda_{,}$, die des anderen $\lambda_{,,}$, x die Entfernung von irgend einem Punkte eines Strahls längs desselben gemessen, so ist die Entfernung s der Aethertheilchen von der Gleichgewichtslage in irgend einem bestimmten Zeitmomente

$$s = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{,}} x + c_{,}\right) + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{,,}} x + c_{,,}\right)$$

$$= 2A \cos\left[\pi x\left(\frac{1}{\lambda_{,}} - \frac{1}{\lambda_{,,}}\right) + \frac{c_{,} - c_{,,}}{2}\right] \sin\left[\pi x\left(\frac{1}{\lambda_{,}} + \frac{1}{\lambda_{,,}}\right) + \frac{c_{,} - c_{,,}}{2}\right]$$

oder wenn wir setzen

$$\frac{2}{l_{,}} = \frac{1}{\lambda_{,}} - \frac{1}{\lambda_{,,}} \qquad 2\gamma_{,} = c_{,} - c_{,,}$$

$$\frac{2}{l_{,,}} = \frac{1}{\lambda_{,}} + \frac{1}{\lambda_{,,}} \qquad 2\gamma_{,,} = c_{,} + c_{,,}$$

so erhalten wir

$$s = 2A \cos\left(\frac{2\pi x}{l_{,}} + \gamma_{,}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{l_{,,}} + \gamma_{,,}\right).$$

Die Entfernungen der Punkte, wo $s = 0$, sind nun in diesem Falle leicht zu bestimmen. Nämlich die Nullpunkte des Factors $\sin\left(\frac{2\pi x}{l_{,,}} + \gamma_{,,}\right)$ liegen um die Länge $\frac{1}{2} l_{,,}$ von einander entfernt, die des Factors $\cos\left(\frac{2\pi x}{l_{,,}} + \gamma_{,}\right)$ um die viel grössere Länge $l_{,,}$ und können sich zwischen jene ersteren einschieben, oder mit ihnen zusammenfallen. Im letzteren Falle namentlich würde man nach Grailich's Principien lauter gleiche Wellenlängen in der zusammengesetzten Bewegung haben, die alle denselben Farbeneindruck hervorbrächten, und auch wenn die Nullpunkte beider Factoren nicht zusammenfielen, könnten die selteneren des Cosinus den Eindruck, den die häufigeren Wellen des Sinusgliedes machen, nicht wesentlich stören. Daraus folgt aber nach Grailich's eigener Rechnung, dass Violett und Roth Grün geben müssten, während sie in Wirklichkeit Purpurroth geben, und überhaupt stimmen die Resultate bei kleinen Differenzen der Wellenlängen mit der Erfahrung, während sie bei grossen Differenzen beträchtlich abweichen, da der Werth von $l_{,,}$ immer nur zwischen $\lambda_{,}$ und $\lambda_{,,}$ liegen kann, und einem der mittleren Töne des Spectrum entsprechen muss. Ich glaube deshalb, dass die Annahmen der Grailich'schen Theorie noch beträchtlich zu modificiren sein werden, ehe sie der Erfahrung genügend entsprechen kann, wenn man überhaupt auf diesem Wege eine Erklärung suchen will.

Die einfachste unter den Methoden, um prismatische einfache Farben zu mischen, und gleichzeitig alle Combinationen aus je zwei solchen zu erhalten, ist die, dass man in einem dunklen Schirme einen *v*förmigen Spalt anbringt, dessen beide Schenkel wie *ab* und *bc* in *Fig. 122 A* unter 45° gegen den Horizont geneigt sind, und diesen Spalt, der vor

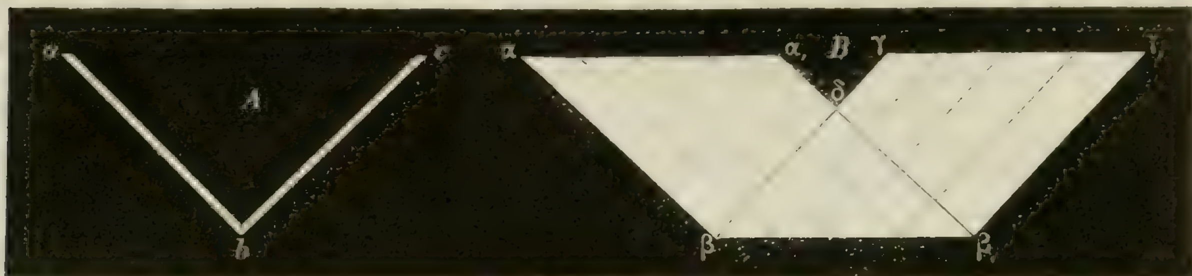


Fig. 122. *Fig. 123.*

einen hellen Hintergrund gestellt ist, durch ein Prisma mit senkrecht stehender brechender Kante betrachtet. Die Spectra haben dann die Form wie in *Fig. 123*, wo $\alpha\beta\beta_{,}\alpha_{,}$ das Spectrum des Schenkels *ab* und $\gamma\beta\beta_{,}\gamma_{,}$ das Spectrum von *bc* ist. In dem ersteren laufen die Farbenstreifen parallel *ab* und $\alpha\beta$, im zweiten parallel *bc* und $\beta\gamma$, wie die gestrichelten Linien. In dem mittleren dreieckigen Felde $\beta\delta\beta_{,}$, welches beiden Spectren gemeinsam ist, schneiden alle Farbenstreifen des einen Spectrum alle Farbenstreifen des andern, und es entstehen dadurch an diesen Stellen alle aus je zwei einfachen Farben gebildeten Mischfarben. Wenn die Breite der Spalten unveränderlich ist, so kann doch das Verhältniss der Quantitäten des gemischten Lichtes dadurch geändert werden, dass man das Prisma aus der senkrechten Stellung in eine geneigte bringt, wodurch die Spectra die Form wie *Fig. 124* annehmen und das eine $\beta\gamma\beta_{,}\gamma_{,}$, in welchem dieselbe Lichtmenge auf einen kleineren Raum vertheilt wird, heller wird, während das andere $\alpha\beta\beta_{,}\alpha_{,}$, dessen Flächenraum vergrössert ist, an Helligkeit verliert.

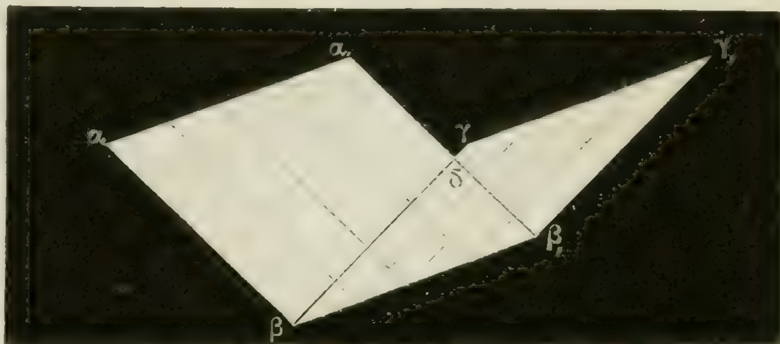


Fig. 124.

Man kann durch diese Methode die meisten der oben angeführten Resultate gewinnen. Eine genaue Beurtheilung der Mischfarben, namentlich der weisslicheren, ist aber erstens dadurch erschwert, dass die einzelnen Farben einen zu kleinen Raum einnehmen, selbst wenn man die Beobachtung mit einem Fernrohr ausführt, zweitens dadurch, dass man im Gesichtsfelde eine Menge anderer glänzender Farben daneben hat, welche durch Contrastwirkungen das Ansehen der minder gesättigten Farben stark verändern.

Diese Uebelstände sind bei einer zweiten Methode vermieden; für diese wird ein complicirterer Apparat gebraucht, von dem *Fig. 125* eine horizontale Projection darstellt. Man lässt

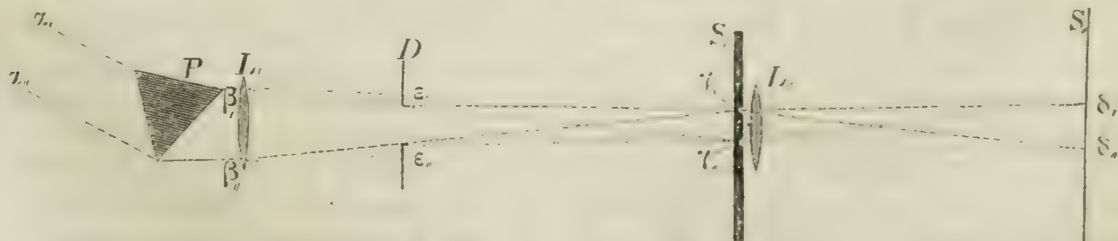


Fig. 125.

Sonnenlicht, welches von einem Heliostaten reflectirt ist, durch einen verticalen Spalt in ein dunkles Zimmer fallen, lässt es durch ein Prisma *P Fig. 125* und eine achromatische Linse *L,*

gehen, in deren Brennpunkt ein Schirm $S_{,}$ steht, auf dessen vorderer Fläche ein objectives Spectrum entworfen wird. Zwischen Linse und Schirm befindet sich ein Diaphragma D mit rechteckigem Ausschnitt. Der Schirm $S_{,}$ hat zwei verticale Spalten bei $\gamma_{,}$ und $\gamma_{,,}$, welche von dem Lichte, das hier zu dem Spectrum vereinigt ist, zwei Farbenstreifen durchgehen lassen, während alles andere farbige Licht von dem Schirme zurückgehalten wird. Hinter diesem Schirme ist eine zweite achromatische Linse $L_{,,}$ von kürzerer Brennweite angebracht, welche auf dem zweiten Schirme $S_{,,}$ ein Bild $\delta_{,}\delta_{,,}$ des Diaphragma D entwirft. Die Breite des einfallenden weissen Strahlenbündels ist $\alpha_{,}\alpha_{,,}$; hinter der Linse $L_{,}$ sind die Grenzstrahlen der beiden verschiedenfarbigen Strahlenbündel, deren Brennpunkte mit den beiden Spalten $\gamma_{,}$ und $\gamma_{,,}$ zusammenfallen, dadurch unterschieden, dass die brechbareren gestrichelt, die weniger brechbaren punktirt sind. Die Oeffnung des Diaphragma D muss so eng gemacht werden, dass sie ganz von Strahlen beider Bündel ausgefüllt ist, so dass von jedem Punkte der Oeffnung Strahlen der betreffenden Farbe auf jeden Punkt der Spalten $\gamma_{,}$ und $\gamma_{,,}$ fallen. Macht man die vordere Seite des Diaphragma weiss, so sieht man darauf das Strahlenbündel als weissen Fleck mit farbigen Rändern sich projiciren (bei $\varepsilon_{,}$ blau, bei $\varepsilon_{,,}$ roth). Um die genannte Bedingung zu erfüllen, muss die Oeffnung ganz in der weissen Mitte der beleuchteten Stelle liegen. Unter diesen Umständen ist die Oeffnung des Diaphragma gleichsam das leuchtende Object, von welchem zweierlei Licht durch die Spalten des Schirms $S_{,}$ auf die Linse $L_{,,}$ fällt. In dem Bilde $\delta_{,}\delta_{,,}$, welches die Linse von dem Diaphragma D entwirft, ist beiderlei Art Licht über dieselbe gleichmässig ausgebreitet, und diese Fläche erscheint daher in der Mischfarbe, oder wenn man eine der Spalten verdeckt, in einer der einfachen Farben.

Um den Farbenton und die Intensität der gemischten Lichter nach Belieben und sehr allmälig ändern zu können, ist eine besondere Construction des Schirms $S_{,}$ nöthig, und ist derselbe auf *Taf. IV., Fig 2* abgebildet. Der Schirm besteht aus der viereckigen Messingplatte $AABB$, die bei C durch einen cylindrischen Stab getragen wird. Letzterer verschiebt sich in einer gespaltenen cylindrischen Hülse D, die in der Mitte eines mit drei Stellschrauben versehenen Brettes befestigt ist. Der Schirm kann also mit seinem Träger C auf und nieder geschoben, und in jeder Höhe mittels des gespaltenen und durch eine Schraube zusammengezogenen Ringes E festgestellt werden.

Auf der Messingplatte $AABB$ sind in schräger Richtung zwei Schlitten beweglich, deren Grundlagen die Messingplatten aa und $\alpha\alpha$ sind. Mit bb, $\beta\beta$, c und c sind die Schienen bezeichnet, zwischen denen sich die Platten verschieben. Diese Platten werden durch die Schrauben d und δ bewegt, deren Mütter in die an der grossen Platte $AABb$ befestigten Messingklötze e und ε eingeschnitten sind, und deren Enden drehbar in den Klötzen g und γ befestigt sind, welche von den beweglichen Platten getragen werden. Durch Drehung der Schrauben d und δ verschiebt man also die Platten aa und $\alpha\alpha$ parallel den Schienen, zwischen denen sie als Schlitten gehen.

Auf der beweglichen Platte aa ist nun wieder als Schlitten beweglich die Platte f zwischen horizontalen Schienen angebracht, und durch die Schraube m zu verstellen. Ebenso auf der Platte $\alpha\alpha$ die Platte φ mit der Stellschraube μ. Zwischen den einander zugekehrten Rändern der Platten f und φ liegen noch die beiden dreieckigen ebenso dicken Platten l und λ, jene auf aa, letztere auf $\alpha\alpha$ befestigt. Die einander zugekehrten und zugeschärften Ränder von f und l, sowie von φ und λ bilden zwei Paare Gravesande'scher Schneiden.

Dahinter befindet sich in der grossen Platte $AABB$ ein entsprechender Ausschnitt, um das Licht, welches durch die beiden Spalten gegangen ist, weiter hindurchzulassen. Die vorderen Flächen von f, l, φ und λ sind matt versilbert, um das Spectrum darauf gut projiciren zu können. Der Ort des Spectrum ist durch das kleine punktirte Rechteck angedeutet.

Verschiebt man mittels der Schrauben d und δ die Platten aa und $\alpha\alpha$, so treten die Spalten unter einen anderen Ort des Spectrum, und es gehen andere Farbentöne durch sie hindurch. Durch die Schrauben m und μ dagegen ändert man die Breite der Spalten und damit auch die Menge des durchgelassenen Lichtes.

Es kommt darauf an, dass der Vereinigungspunkt gleichfarbiger Strahlen, welche durch die Linse $L_{,}$ gegangen sind, genau auf der Ebene des Schirms $S_{,}$ liegt, sonst zeigt das

Farbenfeld auf S_{II} von rechts nach links verschiedene Farbentöne. Die Spalten müssen den dunklen Linien des Spectrum parallel sein, was durch die Stellschrauben am Fusse des Schirms S_I bewirkt werden kann. Auch müssen alle Unreinigkeiten an der Linse und Prisma, welche gefärbte Flecke in dem Farbenfelde geben würden, sorgfältig entfernt werden. Zwischen den beiden einzelnen Linsen der achromatischen Doppellinse L_I bilden sich leicht Newton'sche Ringe, die im Farbenfelde abgebildet werden. Diese entfernt man, indem man Canadabalsam zwischen die Linsen bringt. Je weiter man übrigens das Diaphragma D von der Linse L_I entfernt, desto verwaschener ist das Bild solcher Flecken in den Gläsern, und desto weniger stören sie. Es ist deshalb die hier abgebildete Anordnung des Apparats besser, als die früher von mir beschriebene.

Bei dieser Methode hat das farbige Feld eine grössere Ausdehnung als bei der ersten, und alle anderen Farben, welche durch Contrastwirkungen stören könnten, sind entfernt. Doch bleiben noch in vielen Fällen manche Hindernisse bestehen, die eine ruhige und sichere Beurtheilung der Mischfarbe erschweren. Es macht sich erstens die Farbenzerstreuung im Auge bei Zusammensetzungen nur zweier einfacher Farben von sehr verschiedener Brechbarkeit viel bemerkbarer als bei weissem Lichte (s. oben S. 128). Der Rand des Farbenfeldes färbt sich deshalb leicht mit einer von beiden Farben, während in der Mitte die andere überwiegt. Dann ist das Auge bei einigen weissen Mischfarben, namentlich bei dem aus Roth und Grünblau zusammengesetzten Weiss, ausserordentlich empfindlich gegen die kleinsten Einmischungen einer der ursprünglichen Farben, so dass die kleinsten Ungleichmässigkeiten des Apparats und etwa vorhandene Nachbilder im Auge, namentlich bei grösserer Lichtstärke, sehr stören. Endlich sind hierbei auch die Verschiedenheiten des Eindrucks zwischen Mitte und Randtheilen der Netzhaut sehr auffallend. Verhältnissmässig am leichtesten ist es, Weiss aus Gelb und Indigo zusammenzusetzen, schwerer aus Gelbgrün und Violett oder Goldgelb und Wasserblau, am schwersten aus Roth und Grünblau.

Die Wellenlängen der complementären einfachen Farben habe ich in der Weise bestimmt, dass ich die Linse L_{II} und den Schirm S_{II} entfernte und aus einiger Entfernung die Spalte des Schirms S_I durch ein Fernrohr betrachtete, vor dessen Objectiv eine Glasplatte mit feinen äquidistanten verticalen Linien angebracht war. Man sieht dann Diffractionsspectra der Spalten, deren scheinbare Entfernung von dem betreffenden Spalte der Wellenlänge proportional ist. Man braucht also nur in derselben Weise die Entfernung der Diffractionsspectra für eine der dunklen Linien des Spectrum zu messen, deren Wellenlänge Fraunhofer bestimmt hat, so ergeben sich daraus leicht die Wellenlängen der beobachteten gemischten Farben.

Um das farbige Licht der Pigmente und anderer Naturkörper zu mischen, ist das einfachste Verfahren folgendes. In einiger Entfernung (1 Fuss) über einer schwarzen Tischplatte bringt man eine kleine vertical gestellte Glasplatte a mit ebenen und parallelen Flächen an, deren Ebene verlängert die Tischplatte in d schneiden möge. Indem das Auge des Beobachters schräg abwärts nach der Glasplatte a hinsieht, sieht er mittels des von der Platte durchgelassenen Lichtes den Theil db des Tisches, mittels des reflectirten Lichtes dagegen den Theil dc scheinbar mit db zusammenfallend. Legt man in gleicher Entfernung von d in c und in b gefärbte Oblaten oder andere gefärbte Flächen hin, so erblickt der Beobachter das Spiegelbild von c mit b zusammenfallend. Das farbige Licht von c schlägt an der Vorderfläche der Glasplatte a genau denselben Weg ein,

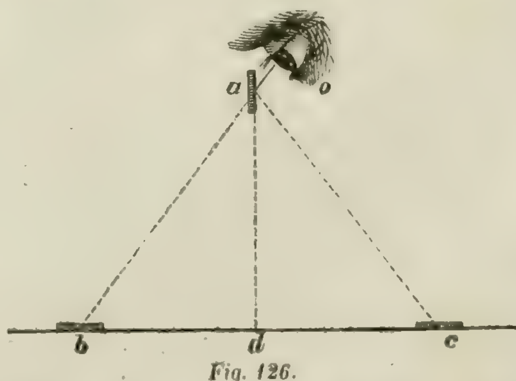


Fig. 126.

auf welchem das farbige Licht von b fortgeht, und beide Lichter fallen also gemischt in das Auge o, das von ihm gesehene gemeinsame Bild von b und c muss also in der Mischfarbe erscheinen. Das Intensitätsverhältniss regulirt man durch Verschiebung der beiden Oblaten. Je näher sie an d liegen, desto stärker ist das reflectirte Licht von c, desto schwächer das durchgelassene von b.

Man kann auf diese Weise auch Licht, welches durch farbige Gläser oder Flüssigkeiten gegangen ist, zur Mischung anwenden. Dazu macht man in der Platte *bc* Oeffnungen, durch welche das Licht gelangt. So kann man auch das durch einen Spiegel reflectirte Licht des blauen Himmels mit dem von Chromgelb mischen, und sich überzeugen, dass beide, wie Ultramarin und Chromgelb, ein röthliches Weiss geben, dass das Himmelblau also weissliches Indigblau ist, nicht aber dem weniger brechbaren Blau des Spectrum entspricht, welches wir Cyanblau genannt haben.

Die zuletzt beschriebene Methode hat vor den Mischungen auf dem Farbenkreisel den Vorzug, dass die weisslichen Mischungen nicht grau, sondern weiss erscheinen. Die Einrichtung der Farbenkreisel wird in §. 22 näher beschrieben werden. Als weitere Methoden, farbiges Licht zusammenzusetzen, ist noch zu erwähnen ein Versuch von Volkmann, der durch gefärbte Gewebe, die er dicht vor das Auge hielt, nach farbigen Flächen hinsah. Die Mischung beider Farben wird aber schwer recht gleichmässig, und es kann auch die Durchsichtigkeit der Fäden stören, indem die Fäden theilweis wie ein farbiges Glas wirken, durch welches man eine farbige Fläche sieht. Czermak hat den Scheiner'schen Versuch benutzt, indem er durch einen Schirm mit zwei engen Oeffnungen sah, welche mit verschiedenfarbigen Gläsern bedeckt waren. So weit die Objecte einfach erscheinen, erscheinen sie auch in der Mischfarbe. Holtzmann lässt das diffus reflectirte Licht zweier farbigen Papiere auf weisses Papier fallen. Challis erwähnt Versuche, wie sie übrigens schon Mile angestellt hatte, bei denen Papiere, die mit Streifen verschiedener Farben versehen waren, aus solcher Entfernung betrachtet wurden, dass die Streifen einzeln nicht mehr erkannt werden konnten. Endlich hat Dove Methoden beschrieben, um Interferenz- und Absorptionsfarben zu mischen. Er benutzt dazu Spiegel, die aus farbigen Gläsern mit Silber belegt gebildet sind. Die vordere Fläche solcher Spiegel giebt polarisirtes weisses Licht, die hintere unpolarisirtes durch Absorption gefärbtes. Geht nun das so gemischte Licht durch eine Glimmerplatte und ein Nicol'sches Prisma, so bleibt das letztere Licht unverändert. Das polarisirte weisse Licht dagegen wird durch die Interferenz des ordentlichen und ausserordentlichen Strahls im Krystall so gefärbt, dass seine Farbe einer der Farbenstufen von Newton's Ringsystemen entspricht. Beide Arten von Licht fallen vermischt in das Auge des Beobachters.

Die Lehre von der Farbenmischung ging von den Erfahrungen der Maler über Mischung der Pigmente aus. Schon Plinius erwähnt, dass die älteren griechischen Maler mit vier Farbstoffen alles darzustellen gewusst hätten, während man zu seiner Zeit deren viel mehr besässe, und doch nicht so viel, wie jene, leistete. Und doch ist auch in dem berühmten Gemälde der Aldobrandinischen Hochzeit aus der Römerzeit der Aufwand von Farbstoffen sehr klein, wie Davy's chemische Untersuchungen zeigten [1]. Leonardo da Vinci nennt ausser Schwarz und Weiss, welche jedoch nicht im eigentlichen Sinne Farben wären, vier einfache Farben, nämlich Gelb, Grün, Blau und Roth; sonst fordert er noch an einer anderen Stelle für die Malerei Orange (*lionato*) und Violett (*morello, cioè pavonazzo*). Dass Leonardo das Grün stets als einfache Farbe zählt, obgleich er weiss, dass es gemischt werden kann, widerspricht eigentlich seiner Definition der einfachen Farben als solcher, die nicht gemischt werden können. Sollte er bemerkt haben, dass das ungemischte Grün viel lebhafter ist als das gemischte? Die nachher gewöhnlich angenommenen drei Grundfarben Roth, Gelb und Blau findet man schon vor Newton's Untersuchungen, als eine damals allgemein anerkannte wissenschaftliche Thatsache erwähnt in einem Versuch zur Classification der Farben und Farbstoffe von Waller. Darin, dass man drei Grundfarben ausreichend findet, liegt schon die Anerkennung der Thatsache, dass die Beschaffenheit des farbigen Lichtes eine Function nur dreier Variablen ist; auf die Wahl der Grundfarben, welche erst viel später Wünsch und Thomas Young zu ändern suchten, haben die Erfahrungen über gemischte Pigmente den entschiedensten Einfluss. Man meint aus Gelb und Blau Grün zusammensetzen zu können. Das ist richtig, wenn man es auf die Pigmente bezieht, aber nicht für farbiges Licht.

Newton setzte zuerst farbiges Licht zusammen, und zwar das des prismatischen Spectrum, benutzte aber daneben für Aufstellung der Regel der Farbenmischung die Mischung farbiger Pulver, und legte auf die Abweichungen zwischen beiden, die ihm nicht ganz entgangen zu sein scheinen, kein grosses Gewicht, da ihm die experimentellen Hülfsmittel noch fehlten, die Sache genauer zu verfolgen. Er erwähnt, dass aus *subflavum* und *cyaneum* (d. h. grünlich

---

[1] Gilbert's Annalen. LII, 1.

Gelb und Cyanblau) nur ein weissliches Grün zu erzeugen sei. NEWTON stellte auch zuerst einen genaueren Ausdruck des Gesetzes der Farbenmischung hin, indem er es auf die oben besprochene graphische Darstellung und Schwerpunktsconstrutionen zurückführte. Sein Gesetz entsprach den vorliegenden experimentellen Erfahrungen, eine genauere Prüfung hat er nicht versucht. Seine Darstellung des Systems der Farben auf einem Kreise war eine Erweiterung des Systems dreier objectiver Grundfarben; über das Ungenügende des letzteren Systems spricht er sich aber nirgends aus.

Dagegen kehrten die späteren Physiker bei ihren Versuchen, das System der Farben zu ordnen, meist zum System der drei Grundfarben zurück, so LE BLOND 1735, DU FAY 1737, TOBIAS MAYER 1758, J. H. LAMBERT 1772, D. R. HAY, J. D. FORBES. Ihre Farbensysteme sind praktisch ausgeführt meist in der Weise, dass sie bestimmte Pigmente, nach bestimmten Gewichtsverhältnissen mischten. MAYER brauchte Zinnober, Königsgelb (Chromsaures Bleioxyd) und Bergblau (Kobaltglas), LAMBERT Carmin, Gummigutt, Berliner Blau (Eisencyanürcyanid). Letzterer bestimmte auch die Sättigungsverhältnisse dieser Farbstoffe, indem er die Gewichtsmengen bestimmte, in denen je zwei gemischt werden müssen, um eine Mischfarbe hervorzubringen, welche gleich weit von den Farben ihrer beiden Bestandtheile entfernt sei. Er musste nehmen von Carmin 1 Theil, von Berlinerblau 3 Theile, von Gummigutt 10 Theile. Letztere Gewichte wählte er dann als Maasseinheiten bei Anfertigung der Mischungen. Uebrigens fallen die Mischungen so weit von einander entfernter Farbstoffe immer ziemlich unansehnlich und grau aus.

Neuere Beobachtungen, welche unter Umständen, wo Mischung farbigen Lichts zu erwarten war, von der bisherigen Regel abweichende Resultate lieferten, machten 1829 PLATEAU am Farbenkreisel, VOLKMANN 1838 an Zerstreuungsbildern, ohne aber dadurch zu einer näheren Untersuchung des Widerspruchs geführt zu werden. Ich selbst wurde durch Versuche über Mischung der Spectralfarben zu der Erkenntniss geführt, dass Mischung des Lichts und Mischung von Pigmenten verschiedene Resultate gebe, und erörterte die Gründe davon. Ich hatte hierbei die Mischung der Spectralfarben mittels des *v* förmigen Spaltes benutzt und nur aus Gelb und Indigblau Weiss erhalten, nicht aus irgend welchen anderen Paaren von Spectralfarben. Dies widersprach dem Mischungsgesetz von NEWTON und veranlasste GRASSMANN zu einer ausführlichen Erörterung der Principien von NEWTON's Mischungsgesetz. Die Untersuchung der gemischten Spectralfarben nach einer besseren Methode, welche ich ausführte, hob die scheinbaren Widersprüche gegen NEWTON's Regel auf, so weit sie sich auf die Anwendbarkeit der Schwerpunktsconstructionen beziehen; dagegen musste ich freilich die Kreisform des Farbenfeldes GRASSMANN gegenüber als unerwiesen stehen lassen. Endlich sind nun die Principien von NEWTON's Mischungsgesetz experimentell geprüft worden 1857 durch MAXWELL.

TH. YOUNG's Theorie der Farbenempfindungen ist wie so vieles, was dieser bewundernswürdige Forscher seiner Zeit voraneilend geleistet hatte, unbeachtet liegen geblieben, bis ich selbst und MAXWELL wieder auf sie aufmerksam machten. Man begnügte sich mit der Annahme, dass der Sehnerv verschiedenartiger Empfindungen fähig sei, ohne weiter nach dem Grunde zu suchen, warum das System dieser Empfindungen eben ein solches sei, wie es das Auge darbietet.

1519. LEONARDO DA VINCI. *Trattato della pittura.* Paris 1651.
1686. R. WALLER. *A catalogue of simple and mixte colours. Phil. Trans.* 1686.
1704. * NEWTON. *Optice.* Lib. 1. P. II. Prop. IV—VI.
1735. LE BLOND. *Il Colorito.* London.
1737. DU FAY. *Mém. de l'Acad. roy. de Paris 1737.*
1758. T. MAYER in Göttinger gelehrte Anz. 1758. St. 147.
1772. J. H. LAMBERT. Beschreibung einer Farbenpyramide. Berlin.
1792. WÜNSCH. Versuche und Beobachtungen über die Farben des Lichts. Gilbert's Ann. XXXIV. 10.
1807. TH. YOUNG. *Lectures on natural philosophy.* London.
1829. PLATEAU. *Dissert. sur quelques propriétés des impressions produites par la lumière sur l'organe de la vue.* Lüttich.
1836. CHALLIS in Pogg. Ann. XXXVII. 528.
1838. VOLKMANN in J. MÜLLER's Archiv für Anat. und Physiol. 1838. S. 373.
1839. MILE ebenda 1839. S. 64.
D. R. HAY. *Nomenclature of colours.*
1843. J. MÜLLER Zusammensetzung des weissen Lichts aus den verschiedenen Farben. Pogg. Ann. LVIII. 358. 518.
1847. DOVE. Ueber die Methoden aus Complementärfarben Weiss darzustellen, und über die Erscheinungen, welche polarisirtes Licht zeigt, dessen Polarisationsebene ge-

drebt wird. Berliner Monatsber. 1846. p. 70; Pogg. Ann. LXXI. 97; *Phil. Mag.* XXX. 465; *Inst.* No. 712. p. 176; *Arch. d. sc. ph. et nat.* V. 276.

Chevreul. *Exposé d'un moyen de définir et nommer les couleurs d'après une méthode rationelle et expérimentale. Quesneville revue scient.* XXIX. 382. C. R. XXXII. 693. *Inst.* No. 906. p. 155. Dingl. polyt. J. CXXI. 367. Athen. 1851. p. 272.

1848. Brücke. Ueber das Wesen der braunen Farbe. Pogg. Ann. LXXIV. 461. *Phil. Mag.* XXXIII. 281. *Inst.* No. 785. p. 21.

Harless. Physiologische Beobachtung und Experiment. Nürnberg 1848. S. 45. (Eine Farbe durch die andere gesehen.)

Chr. Doppler. Versuch einer systematischen Classification der Farben. Prag 1848, aus Abhandl. der böhm. Ges. V. 401.

1849. J. D. Forbes. *Hints towards a classification of colours. Philos. Magaz.* XXXIV. 161.

1852. * H. Helmholtz. Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben. Müller. Archiv für Anat. und Physiol. 1852. S. 461—482. Pogg. Ann. LXXXVII. 45—66; *Philos. Magaz.* (4) IV. 519—534; *Cosmos.* II. 112—120. *Ann. de chim.* (3) XXXVI. 500—508; Fechner, Centralblatt 1853. p. 3—9.

1853. L. Foucault. *Sur la récomposition des couleurs du spectre en teintes plates. Cosmos.* II. 232; Pogg. Ann. LXXXVIII. 385—387.

* H. Grassmann. Zur Theorie der Farbenmischung. Pogg. Ann. LXXXIX. 69—84. *Philos. Magaz.* (4) VII. 254—264.

1853. Holtzmann. Apparat zur Darstellung von Farbenmischungen. Tagblatt der deutschen Naturforscherversammlung 1853.

J. Plateau. Reclamation. Pogg. Ann. LXXXVIII. 172—173. *Cosmos.* II. 241. Fechner. Centralblatt. 1853. p. 365.

H. Helmholtz. *On the mixture of homogeneous colours.* Athen. 1853. p. 1197—1198; *Cosmos.* III. 573—575; *Rep. of Brit. Assoc.* 1853. 2. p. 5. Pogg. Ann. XCIV. 1—28. *Ann. de chim.* (3) XLIV. 70—74. *Arch. d. sc. phys.* XXIX. 242.

1854. J. Grailich. Beitrag zur Theorie der gemischten Farben. Wiener Ber. XII. 783—847. XIII. 201—284.

J. Czermak. Physiologische Studien. Wien. Ber. XII. 322. §. 6 und XVII. 565.

1855. * J. C. Maxwell. *Experiments on colour, perceived by the eye, with remarks on colour blindness. Edinb. Trans.* XXI. 275—297. *Edinb. Journ.* (2) I. 359—360. *Proc. of Edinb. Soc.* III. 299—301. *Philos. Mag.* (4) XIV. 40.

G. Wilson. *Observations on Mr.* Maxwell's *paper. Edinb. J.* (2) I. 361.

J. D. Forbes. *Observations on Mr.* Maxwell's *paper. Edinb. J.* (2) I. 362.

1856. J. C. Maxwell. *On the theory of compound colours with reference to mixtures of blue and yellow light.* Athen. 1856. p. 1093. *Edinb. J.* (2) IV. 335—337. *Inst.* 1856. p. 444. *Rep. of British Assoc.* 1856. 2. p. 12—13.

Challis. *On theory of the composition of colours on the hypothesis of undulations. Phil. Mag.* (4) XII. 329—338 und 521.

G. G. Stokes. *Remarks on* Challis's *paper. Phil. Mag.* (4) XII. 421.

1857. Dove. Eine Methode Interferenz- und Absorptionsfarben zu mischen. Berl. Monatsber. 11. März 1857. Pogg. Ann. CII.

Farbenblindheit.

Huddart. *Phil. Trans.* LXVII. I. 14.

Collardo. *Journ. de Physique.* XII. 86.

Whisson. *Phil. Trans.* LXVIII. II. 611. *Journ. de Phys.* XII.

Giros v. Gentilly. Theorie der Farben (unter dem Pseudonym G. Palmer engl. und französ. erschienen. Lichtenberg Magazin. I. 2. 57.

Harvey. *Edinb. Phil. Trans.* X. 253. *Edinb. J. of Sc.* VII. 85.

J. Butters. *Edinb. Phil. Journ.* XI. 135. Archiv für Physiol. v. Meckel. V. 260.

Nicholl. *Medico chir. Trans.* VII. 477. IX. 359. *Ann. of Phil.* N. S. III. 128.

v. Goethe. Zur Naturwiss. und Morphologie. 1. Heft. 297. Zur Farbenlehre. 1. §. 103.

Meckel. Archiv für Physiol. I. 188. *Ann. of philos.* 1822. Febr. p. 128.

Wardrop. *Essays on the morbid anatomy of the human eye.* London 1818. II. 196. Meckel. Archiv für Physiol. V.

Brewster. *Edinb. Journ. of Sc.* VII. 86. XIX. 153. *Edinb. phil. J.* VI. Pogg. Ann. XXIII. 441.

J. Herschel. Artikel *Light* in *Encyclop. metrop.* p. 434. §. 507.

Colqhoun. aus *Glasgow Med. Journ.* in Froriep's Notizen. XXIV. 305.

J. Dalton. *Memoirs of Lit. and Phil. Soc. of Manchester.* V. *Edinb. Journ. of Sc.* IX. 97.

Sommer in Graefe und Walther Journal für Chirurgie. V.

Salzburger medic. chirurg. Zeitung. IV.
GALL. *Anat. et Physiologie du système nerveux.* IV. 98.
ROZIER. *Observ. sur la physique.* XIII.
BREWSTER. Briefe über natürl. Magie. Uebers. S. 44.
HELLING. Prakt. Handbuch der Augenkrankheiten. I. S. 1.
1837. * A. SEEBECK. Ueber den bei manchen Personen vorkommenden Mangel an Farbensinn. Pogg. Ann. XLII. 177—233.
1849. WARTMANN. *Bull. de Brux.* XVI. I. 137. *Inst.* XVII. No. 799. p. 131.
d'HOMBRE FIRMAS. C. R. XXIX. 175. XXX. 60, 376. *Inst.* No. 815. p. 259.
1852. SCHNETZLER. *Arch. d. sciences phys.* XXI. 251—252.
BURCKHARDT. Verh. der naturf. Gesellsch. in Basel. X. 90—93.
1854. WILSON. *Proc. of Edinb. Soc.* III. 226—227.
EICHMANN in FECHNER Centralblatt 1854. p. 294—295. Med. Z. S. des Ver. f. Heilkunde in Preussen 1853. 224.
1853–55. G. WILSON in *Monthly J. of med. science.* Nov. 1853 bis Dec. 1854. *Edinb. Journ.* (2) IV. 322—327.
Derselbe. *Researches on Colour-Blindness.* Edinb. 1855. Darin auch MAXWELL *On the Theory of Colours in relation to Colour-Blindness.* p. 153.
1856. W. POLE. *Proc. of Roy. Soc.* VIII. 172—177. *Phil. Magaz.* (4) XIII. 282—286.
J. TYNDALL. *Phil. Magaz.* (4) XI. 329—333. SILLIMAN J. (2) XXII. 143—146. *Arch. d. sc. phys.* XXXIII. 221—225.

§. 21. Von der Intensität der Lichtempfindung.

Die Intensität des objectiven Lichts ist gleich zu setzen der lebendigen Kraft der Aetherbewegung, und diese bei einfarbigem, gradlinig polarisirten Lichte proportional dem Quadrate der grössten Geschwindigkeit der Aethertheilchen. Wenn Licht aus verschiedener Quelle oder von verschiedener Polarisationsrichtung zusammentrifft, wird die Gesammt-Intensität gleich der Summe der einzelnen Intensitäten.

Wir wollen zunächst untersuchen, wie die Intensität der Lichtempfindung sich verhält, wenn die Intensität des objectiven Lichtes sich verändert, ohne dass die Farbe geändert wird. Wir können diese Verhältnisse an weissem Lichte studiren; einfaches farbiges Licht verhält sich darin nicht anders.

Zunächst ist nachzuweisen, dass die kleinsten wahrnehmbaren Abstufungen der Lichtempfindung nicht gleichen Differenzen der objectiven Helligkeit entsprechen. Man beleuchte eine weisse Tafel mit einem schwachen Lichte, welches die Helligkeit h erzeuge, und stelle einen Körper auf, der auf die Tafel einen Schatten wirft, so dass innerhalb der Grenzen des Schattens die Tafel von jenem ersten Lichte nicht getroffen wird. Dann bringe man ein zweites Licht hinzu von der Helligkeit H, welche dadurch verändert werden kann, dass man dies zweite Licht der Tafel nähert und entfernt. Dann ist die objective Helligkeit im Schatten H, ausserhalb des Schattens $H + h$.

Ist nun die Helligkeit H sehr gering, so wird das Auge den Schatten erkennen, d. h. die Helligkeit H von der $H + h$ unterscheiden. Aber es scheint, dass wie gross auch h sein mag, doch stets eine grössere Helligkeit H existirt, bei welcher der Schatten unsichtbar wird, bei welcher die Differenz h der objectiven Helligkeit also nicht mehr eine wahrnehmbare Steigerung der Empfindung hervorbringt.

Ein Licht von der Stärke des Mondlichts wirft einen wahrnehmbaren Schatten auf weisses Papier. Bringt man eine gut brennende Lampe nahe an

das Blatt, so verschwindet der Schatten. Wiederum verschwindet der Schatten, den das Lampenlicht wirft, wenn man die Sonne auf das Papier scheinen lässt. Ja, die Helligkeit der Flammenfläche einer gut brennenden Lampe mit ringförmigem Dochte ist für das Auge kaum noch von der doppelten Helligkeit zu unterscheiden. Es sind solche Flammen hinreichend durchsichtig, wie man leicht erkennt, wenn man ihr lichtschwaches Spiegelbild in einer unbelegten Glastafel betrachtet und dann eine zweite Flamme hinter die erste schiebt. Man erkennt dann die zweite in ihren Umrissen ganz genau. Sieht man aber mit blossem Auge nach den beiden Flammen hin, so erkennt man die zweite wenigstens durch den hellsten Theil der ersten nicht mehr, oder höchstens nachdem man durch längeres Hinsehen die Intensität der Empfindung abgestumpft hat. Ebenso wenig erkennt man so leicht mit blossem Auge, dass der Rand der Flammenfläche, wo man der Länge nach durch die glühende Gasschicht hindurchsieht, ein sehr viel intensiveres Licht, als die Mitte hat, wo man die kleinste Tiefe der glühenden Schicht vor sich hat, was ebenfalls leicht sichtbar wird, wenn man die Flamme in einem unbelegten Glase gespiegelt betrachtet. Dahin gehört denn ferner auch die Thatsache, dass die Sterne bei Tage verschwinden, dass Bilder hinter einer Glasplatte verschwinden, wenn die Glasplatte spiegelt u. s. w.

Während wir bisher die Differenz der Helligkeit constant erhielten, und nur den absoluten Werth der ganzen Helligkeit veränderten, können wir auch die Differenz in demselben Verhältniss wachsen lassen, wie die Helligkeit wächst. Man bringe auf einer durchsichtigen Glastafel eine Zeichnung mit sehr verdünnter schwarzer Tuschfarbe an, oder lasse sie mit einem schwachen Hauch von Lampenruss anlaufen, und zeichne darin, oder am besten, man nehme ein photographisches auf durchsichtigem Glas ausgeführtes Bild, was theils sehr zarte, theils stärkere Schatten hat, und halte eine solche Zeichnung vor einen hellen Grund von immer steigender Helligkeit. Man wird finden, dass bei geringer Helligkeit des Grundes sehr zarte Schatten unsichtbar sind, bei grösserer sichtbar werden, dann bei immer steigender Helligkeit eine ziemliche Zeit hindurch ungefähr denselben Grad von Deutlichkeit erhalten, endlich aber wieder anfangen zu verschwinden. Je stärker der Schatten in der Zeichnung ist, desto kleiner ist die Helligkeit, wo er anfängt sichtbar zu werden, und desto grösser ist die Helligkeit, welche angewendet werden muss, damit er wieder verschwinde. Nun ist die Helligkeit des Schattens um einen bestimmten Theil der ganzen Helligkeit kleiner, als die Helligkeit der lichten Stellen. Nennen wir letztere H, so können wir die Helligkeit des Schattens gleich $(1 - \alpha) H$ setzen, wo α einen für dieselbe Stelle der Zeichnung constanten ächten Bruch bezeichnet, so dass also die Differenz der Helligkeit zwischen der betreffenden Stelle der Zeichnung und dem hellen Grunde, welche αH ist, mit der Helligkeit H gleichzeitig grösser und kleiner wird. Trotzdem also bei steigender Helligkeit die Unterschiede der absoluten Helligkeit zwischen den verschieden beschatteten Theilen der Zeichnung grösser werden, entsprechen diesen Unterschieden nicht mehr wahrnehmbare Unterschiede der Empfindung. Daraus geht nun hervor, dass es gewisse mittlere Grade der Lichtstärke geben muss, innerhalb welcher das Auge am empfindlichsten ist für eine Veränderung der Helligkeit um kleine Bruchtheile ihrer Grösse. Es

sind dies die von uns gewöhnlich beim Lesen, Schreiben, Arbeiten gebrauchten, unserem Auge angenehmen und bequemen Grade der Helligkeit, also etwa von derjenigen ab, bei welcher man ohne Schwierigkeit lesen kann, bis zu der Helligkeit einer von den directen Sonnenstrahlen getroffenen weissen Fläche. Innerhalb dieser Grenzen der Helligkeit, wo die Empfindlichkeit für Bruchtheile ihr Maximum erreicht, ist die Grösse der Empfindlichkeit auch nahehin constant, wie sich denn überhaupt der Werth continuirlich veränderlicher Functionen in der Nähe ihres Maximum verhältnissmässig wenig zu verändern pflegt. Es geht dies schon für die gewöhnliche Beobachtung aus dem Umstande hervor, dass man Gemälde und Zeichnungen, welche mannigfaltige Abstufungen des Schattens darbieten, ziemlich gleich gut bei Kerzenlicht und bei starkem Tageslicht erkennt, dass gewöhnlich bei starker Beleuchtung keine neuen Gegenstände und Schattenstufen darauf sichtbar werden, die man nicht schon bei schwacher Beleuchtung gesehen hätte. Ebenso bemerkt Fechner, dass wenn man durch verdunkelnde graue Gläser nach hellen Gegenständen, z. B. dem Himmel mit hellen Wolken, hinsieht, dadurch keine Abstufungen des Schattens verschwinden, die man vorher gesehen hätte, oder neu sichtbar werden. Dasselbe ergeben genauer die photometrischen Messungen. Es hat sich bei diesen Messungen im Allgemeinen gezeigt, dass bei sehr verschiedenen Graden der Helligkeit die Differenz der Helligkeit, welche noch unterschieden werden konnte, nahe denselben Bruchtheil der ganzen Helligkeit bildete. Die Grösse dieser Differenz ist von Bouguer und Fechner in der Weise aufgesucht worden, dass dieselben eine weisse Tafel mit zwei gleichen Kerzenflammen beleuchteten, und einen Stab davor aufstellten, der nun zwei Schatten auf die Tafel warf. Das eine Licht wurde dann so weit entfernt, bis der entsprechende Schatten aufhörte sichtbar zu sein. Ist a die Entfernung des näheren Lichts von der Tafel, b die Entfernung des entfernteren, so verhält sich die Beleuchtungsstärke der Tafel durch beide Lichter etwa $a^2 : b^2$. Bouguer fand, dass das eine Licht etwa 8 mal, Fechner mit Hülfe von Volkmann und anderen Beobachtern, dass es ungefähr 10 mal so weit, als das andere, entfernt sein müsse, damit der Schatten verschwinde, so dass Bouguer also $\frac{1}{64}$ der Lichtstärke, Fechner's Freunde dagegen $\frac{1}{100}$ noch unterscheiden konnten. Arago bemerkte, dass bei der Bewegung noch feinere Unterschiede erkannt werden konnten, und kam unter günstigsten Bedingungen bis auf $\frac{1}{131}$. Masson wendete zur Prüfung rotirende weisse Scheiben mit kleinen schwarzen Sectoren an. Er fand, dass bei schwachem Gesicht zuweilen nur Unterschiede von $\frac{1}{50}$ erkannt wurden, bei guten Augen aber zuweilen noch weniger als $\frac{1}{120}$. Er fand ausserdem, dass die Grenze der Empfindlichkeit auch für instantane Beleuchtung durch den elektrischen Funken von der Lichtstärke ziemlich unabhängig ist. Bei dieser Beleuchtung werden nämlich, wenn sie stark genug ist, die schwarzen und weissen Sectoren für

einen Augenblick sichtbar. Lässt man nun die rotirende Scheibe dauernd von einer Lampe mit der Helligkeit L beleuchten und dann auch von einem elektrischen Funken mit der Helligkeit l, so hat man für einen Augenblick am Orte der weissen Sectoren die Helligkeit $L + l$, am Orte der schwarzen nur die Helligkeit L, und man wird die Sectoren nur erkennen, wenn $L + l$ von L unterschieden werden kann. Veränderte man die Entfernung beider Lichtquellen von der Scheibe, so mussten L und l proportional verändert werden, um an der Grenze der Empfindlichkeit des Auges zu bleiben, woraus denn folgt, dass dasselbe Gesetz wie für constantes Licht, auch für die Wahrnehmbarkeit instantaner Lichtunterschiede gilt.

Fechner hat die Thatsache, dass innerhalb eines grossen Intervalls der Helligkeit die kleinsten wahrnehmbaren Differenzen der Lichtempfindung (nahehin) constanten Bruchtheilen der Helligkeit entsprechen, zur Aufstellung eines allgemeineren Gesetzes benutzt, welches er als ein psychophysisches bezeichnet, und welches auch in anderen Gebieten der Sinnesempfindungen sich bewährt. So erscheinen uns namentlich Differenzen der Tonhöhe als gleich gross, wenn die Differenzen der Schwingungsdauer gleiche Theile der ganzen Schwingungsdauer betragen. Aehnlich verhält es sich ferner nach E. H. Weber's Untersuchungen mit unserer Fähigkeit, die Differenzen von Gewichten und Lineargrössen zu erkennen. Wie wir nun die Tonhöhe messen durch den Logarithmus der Schwingungszahl, so erscheint es passend, die Empfindungsstärke ähnlich zu messen, indem wir in diesem wie in jenem Falle gleich deutlich wahrnehmbare Unterschiede dE der Empfindungsstärke E als gleich gross ansehen. Dann ist also innerhalb weiter Grenzen der Helligkeit H nahehin

$$dE = A \frac{dH}{H}$$

wo A eine Constante ist. Daraus folgt mittels der Integration

$$E = A \log H + C,$$

wo C eine zweite Constante bezeichnet. Wenn wir für die Helligkeit h die Empfindungsstärke gleich e setzen, wird die letztere Gleichung:

$$E - e = \log \frac{H}{h}.$$

Fechner hat gezeigt, dass diese Art, wie das Auge Helligkeiten misst, auch bei der Aufstellung der Sterngrössen einen bestimmenden Einfluss geübt hat. Die Grössenklassen der Sterne hat man bestimmt nach dem Eindruck, den sie auf das menschliche Auge machen, zunächst ohne photometrische Messungen der objectiven Lichtmenge. Erst in neuerer Zeit sind dergleichen hinzugekommen, und erlauben nun die wirkliche Helligkeit mit der angenommenen Grössenklasse zu vergleichen. Fechner hat eine solche Vergleichung nach den photometrischen Bestimmungen von J. Herschel und Steinheil ausgeführt, und findet die Grössenklasse G ausgedrückt, für Herschel's Messungen durch die Formel

$$G = 1 - 2{,}8540 \log H$$

für STEINHEIL's Messungen durch

$$G = 2{,}3114 - 2{,}3168 \log H,$$

welche Formeln mit den oben aufgestellten in Uebereinstimmung sind, wenn man bemerkt, dass die Grössenklassen steigen, wenn die Sterngrössen fallen, und ebenso findet sich sehr genügende Uebereinstimmung zwischen den Formeln und den Beobachtungen. Auch für die Messungen von STRUVE hat FECHNER eine hinreichende Uebereinstimmung mit seinem Gesetze nachgewiesen. Dasselbe Gesetz ist übrigens auch von BABINET [1] ausgesprochen, welcher die Zahl, die dem Coefficienten von log H in FECHNER's Formel entspricht, zu 2,5 angiebt nach Beobachtungen von JOHNSON und POGSON.

Dass das hier aufgestellte Gesetz für die Empfindungsstärke nicht bei sehr kleinen und nicht bei sehr grossen Helligkeiten gilt, erklärt FECHNER durch den Einfluss von störenden Nebenumständen. Bei sehr geringen Helligkeiten muss sich nämlich der Einfluss des subjectiven Eigenlichts des Auges merklich machen. Neben der Reizung durch äusseres Licht ist immer noch eine Reizung durch innere Einflüsse vorhanden, deren Grösse wir gleich setzen können der Reizung durch ein Licht von der Helligkeit H_0. Dann wird also genauer der Ausdruck für die kleinsten wahrnehmbaren Stufen der Empfindungsstärke

$$dE = A \frac{dH}{H + H_0}$$

oder

$$dH = \frac{1}{A}(H + H_0)\, dE,$$

woraus folgt, dass die Steigerung der Helligkeit etwas grösser sein muss, um wahrgenommen zu werden, als wenn H_0 gleich Null wäre, und namentlich wird der Unterschied für kleine Werthe von H bedeutend werden. FECHNER hat nun darauf eine Methode gegründet, die Stärke des Eigenlichts H_0 zu vergleichen mit objectivem Lichte, welche Methode aber allerdings voraussetzt, dass an der unteren Grenze der Helligkeit die Wirksamkeit des besprochenen Gesetzes keine andere Störung erleidet, als eben die durch das Eigenlicht. Wenn ein Auge, welches die Differenz von $\frac{1}{100}$ der Lichtstärke erkennen kann, eine Fläche betrachtet, von der ein Theil durchaus kein äusseres Licht empfängt, ein anderer Theil mit der Helligkeit h beleuchtet ist, so ist mit Berücksichtigung des Eigenlichts des Auges die scheinbare Helligkeit der unbeleuchteten und beleuchteten Theile H_0 und $H_0 + h$. Ist nun h die kleinste wahrnehmbare Helligkeit, so muss nach FECHNER's Betrachtungsweise sein $h = \frac{1}{100} H_0$ und dadurch wäre die Helligkeit H_0 des Eigenlichts gemessen durch ein objectives Licht. Versuche wurden ausgeführt von VOLKMANN, welcher die Stärke des Eigenlichts H_0 fand gleich der Helligkeit einer schwarzen Sammetfläche, beleuchtet durch eine Stearinkerze aus 9 Fuss Entfernung.

[1] *Comptes rendus.* 1857. p. 358.

Die Abweichung von dem Gesetze an der oberen Grenze könnte man mit Fechner wohl darauf schieben, dass das Organ zu leiden beginnt. Die inneren Veränderungen im Nerven, welche den Eindruck des Reizes auf das Gehirn übertragen müssen, können eben eine bestimmte Grösse nicht überschreiten, ohne das Organ zu zerstören, und jeder Wirkung des Reizes ist daher eine obere Grenze gesetzt, welcher denn nothwendig auch ein Maximum der Empfindungsstärke entsprechen muss.

Uebrigens ist denn doch zu bemerken, dass diese Umstände, welche es auch sein mögen, die an der oberen und unteren Grenze der Helligkeit die Gültigkeit von Fechner's Gesetz stören, auch in den mittleren Graden der Helligkeit ihren Einfluss bei genauer Beobachtung geltend machen, was natürlich nicht verhindert, dass jenes Gesetz als eine erste Annäherung an die Wahrheit stehen bleibt. Allerdings sind die meisten Gemälde, Zeichnungen und Photographien von den gewöhnlich vorkommenden Gegenständen der Darstellung gleich gut bei sehr verschiedenen Graden der Lichtstärke zu erkennen. Aber ich habe doch auch in Photographien Schattenabstufungen gefunden, die nur bei einer bestimmten und eng begrenzten Lichtstärke ganz deutlich hervortreten. Dazu gehören namentlich Landschaftsbilder, in denen sehr ferne im Nebel halb verschwimmende Bergketten dargestellt sind, am auffallendsten aber war es mir bei einigen stereoskopischen Photographien von Alpenlandschaften auf Glas, in denen sich Theile der Firnmeere oder ganz mit Schnee bedeckte Bergspitzen zeigen. Solche Schneeflächen sehen bei Lampenlicht oder mässig starkem Tageslicht wie einförmige weisse Flächen aus, während sie gegen den hellen Himmel gekehrt noch zarte Schatten zeigen, die eine Modellirung der weissen Schneeflächen andeuten, und die bei noch stärkerem Lichte wieder verschwinden. In Photographien kann man so zarte Schatten natürlich nur durch Zufall finden, in Gemälden oder Zeichnungen kann man sie nicht erwarten, dagegen geben die rotirenden Scheiben ein leichtes Mittel ab, sehr zarte Schatten zu erzeugen, deren Lichtstärke in jedem gewünschten Verhältniss zur Helligkeit des weissen Grundes steht, wie sie denn auch Masson schon zu photometrischen Versuchen gebraucht hat. Leicht zu erhalten sind solche Schatten, wenn man der Scheibe die Zeichnung wie in *Fig. 127* giebt. Man zieht längs eines oder zweier Radien mit einer Ziehfeder einen unterbrochenen Strich, dessen Theile alle die gleiche Dicke haben. Bei der Rotation der Scheibe geben diese schwarzen Striche graue Kreise auf der Scheibe. Ist d die Breite der Striche, r die Entfernung eines Punktes eines schwarzen Strichs vom Mittelpunkte der Scheibe, so ist die Helligkeit h des grauen Streifens, der bei der Rotation entsteht, wenn wir die Helligkeit der Scheibe gleich 1 setzen

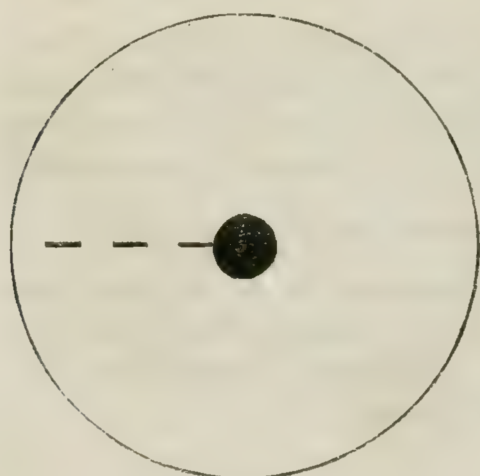


Fig. 127.

$$h = 1 - \frac{d}{2r\pi}.$$

Die grauen Streifen unterscheiden sich also desto weniger von der Helligkeit der Scheibe, je grösser r ist; die inneren sind dunkler, die äusseren heller, und man erhält eine Folge sehr zarter Abstufungen. Beim Versuche hat man nur zu untersuchen, wie weit die Ränder der grauen Streifen noch zu erkennen sind. Man erkennt sie besser, wenn man mit dem Blicke zu den verschiedenen Stellen eines Kreises hin- und hergeht, als wenn man eine Stelle fixirt; im letzteren Falle verschwinden die schwächeren Kreise schnell wieder, auch wenn man sie vorher gesehen hat. Doch erkennt man sie gewöhnlich auch nicht gleich beim ersten Hinsehen nach der Scheibe, sondern man muss letztere erst eine Zeit lang aufmerksam betrachten. Uebrigens muss man darauf achten, dass die Scheibe schnell genug umläuft, dass die grauen Kreise ganz continuirlich erscheinen, und nicht flimmern. Im letzteren Falle erkennt man auch die schwächeren Kreise, weil dann bei jedem einzelnen Vorübergang eines schwarzen Streifens der Lichteindruck sich so weit zu schwächen Zeit hat, dass man die Verdunkelung bemerkt. Ich konnte an hellen Sommertagen am Fenster bei Bewegung des Blicks noch einen Rand scharf sehen, wo der Unterschied der Helligkeit $\frac{1}{133}$ war, und verwaschen erschien mir auch noch ein Rand von $\frac{1}{150}$, auf Augenblicke sogar einer von $\frac{1}{167}$ Unterschied. Etwas mühsamer und anstrengender erschienen die Wahrnehmungen bis zu $\frac{1}{150}$ bei directer Sonnenbeleuchtung der Scheibe. In der Mitte des Zimmers konnte ich zu derselben Zeit nur Ränder von $\frac{1}{117}$ Unterschied wahrnehmen, den von $\frac{1}{133}$ nur selten und unbestimmt.

Also auch hier zeigt sich, dass eine gewisse enger begrenzte Stärke der Erleuchtung die grösste Empfindlichkeit der Wahrnehmung gewährt. Wir dürfen also in der vorher aufgestellten Gleichung

$$dE = A\frac{dH}{H}$$

A nicht als ganz unveränderlich betrachten, auch nicht innerhalb der gewöhnlichen Beleuchtungsstärken. A muss vielmehr von H abhängen, wenn es auch bei mittleren Beleuchtungsstärken nahehin constant ist, und ebenso wird die daraus hergeleitete Integralformel

$$E = A \log H + C$$

nur annähernd richtig sein für die mittleren Werthe der Helligkeit. Dass eine solche Formel nicht genügen kann, wird sich noch weiter zeigen bei Vergleichung der Empfindungsstärke für verschiedene Farben.

Auch wenn wir noch das Eigenlicht des Auges berücksichtigen, und setzen

$$dE = A\frac{dH}{H + H_0}$$

$$E = A \log (H + H_0) + C$$

genügt die Formel den Thatsachen nicht ganz, da ihr zufolge die Empfindlichkeit zunehmen müsste, je weiter die Helligkeit gesteigert würde. Die oben angeführten

Thatsachen sprechen vielmehr dafür, dass für sehr grosse Werthe von H die Empfindungsstärke einen Maximalwerth erreicht, den sie nicht mehr überschreitet, auch wenn H noch steigt. Dann muss also $\frac{dE}{dH}$ gleich Null werden. Demnach würden wir auch in der letzten Differentialgleichung noch A als eine Function von H betrachten müssen, welche für mässige Werthe von H nahehin constant ist, für unendlich grosse aber gleich Null wird. Die einfachste Function dieser Art wäre

$$A = \frac{a}{b + H}$$

worin man sich b als sehr gross vorstellen muss. Setzen wir also

$$dE = \frac{a\,dH}{(b + H)\,(H_0 + H)},$$

so wird

$$E = \frac{a}{b - H_0} \log\left[\frac{H_0 + H}{b + H}\right] + C.$$

Erst durch eine solche Formel würden wir hoffen dürfen, die Erscheinungen vollständig auszudrücken. Darin würde C das Maximum der Empfindungsstärke bedeuten, welches für unendlich grosse Werthe von H eintritt, und das Maximum der Empfindlichkeit würde für $H = \sqrt{b H_0}$ eintreten.

Durch die hier nachgewiesene Abhängigkeit der Empfindungsstärke von der Lichtstärke erklärt sich eine Thatsache, die mir oft aufgefallen ist, dass nämlich in dunkeln Nächten helle Gegenstände verhältnissmässig zu ihrer Umgebung viel heller erscheinen, als bei Tage, sodass man sich zuweilen der Voraussetzung nicht erwehren kann, sie seien selbstleuchtend. Bei sehr geringen Lichtstärken können wir nämlich die Empfindungsstärke der Lichtstärke proportional setzen, bei starker Beleuchtung dagegen ist die Empfindung für hellere Objecte relativ schwächer. Da wir nun gewöhnt sind, die Helligkeit der uns bekannten Objecte bei starker Beleuchtung zu vergleichen, so erscheinen uns bei schwacher Beleuchtung die hellen Gegenstände relativ zu hell, die dunkeln zu dunkel. Diesen Umstand benutzen auch die Maler in Mondscheinlandschaften, um den Eindruck schwacher Beleuchtung hervorzubringen. Sie heben die lichten Stellen viel greller heraus, als wenn sie Tageslicht darstellen.

Wir wenden uns nun zur Vergleichung der Intensität verschiedenfarbigen Lichtes. Wenn wir die Intensität des objectiven einfarbigen und verschiedenfarbigen Lichtes gemessen denken durch die lebendige Kraft der Aetherbewegung, so müssen wir sie nach dem allgemeinen Gesetze von der Erhaltung der Kraft proportional setzen der Wärmemenge, welche bei der Absorption des betreffenden Lichtes entwickelt wird. Es ist dies bisher das einzige physikalische Mittel, durch welches wir die Intensität von Aetherwellen verschiedener Schwingungsdauer vergleichbar machen können. Wenn wir die Leuchtkraft der Aetherwellen verschiedener Schwingungsdauer mit dem Auge vergleichen, so zeigt sich, wie schon in §. 19 auseinandergesetzt wurde, dass die Intensität der Lichtempfindung keineswegs proportional ist der durch die Wärmeentwickelung gemessenen lebendigen Kraft dieser Aetherschwingungen. Wenn wir ein Spectrum mittels

eines Steinsalzprisma entwerfen, welche Substanz unter allen am gleichmässigsten Strahlen verschiedener Art durchgehen lässt, so liegt, wie MELLONI gefunden hat, das Maximum der Wärme jenseits des äussersten Roth, wo das Auge kein Licht mehr empfindet, und die Wärme nimmt im Spectrum continuirlich vom Violett zum Roth zu, während das Maximum des Lichts im Gelb sich findet. Ebenso habe ich schon oben bemerkt, dass die ultravioletten Strahlen, wenn sie durch Fluorescenz in Strahlen mittlerer Brechbarkeit verwandelt werden, an Leuchtkraft ausserordentlich zunehmen, während nicht anzunehmen ist, dass die lebendige Kraft ihrer Schwingungen dadurch vermehrt werden könne. Die Stärke der Lichtempfindung hängt also nicht allein ab von der lebendigen Kraft der Aetherschwingungen, sondern auch von der Schwingungsdauer derselben. Es folgt daraus, dass alle mittels des Auges vollzogenen Vergleichungen der Stärke verschiedenartig zusammengesetzten Lichts keinen von der Natur des Auges unabhängigen objectiven Werth haben.

Wir haben gefunden, dass für gleichartiges Licht die Empfindung nicht proportional der objectiven Lichtstärke wächst, sondern dass die Empfindungsstärke eine verwickeltere Function der Lichtstärke ist. Bei der Vergleichung verschiedenfarbigen Lichtes stellt sich nun heraus, dass die Empfindungsstärke für verschiedenartiges Licht eine verschiedene Function der Lichtstärke ist. PURKINJE[1] hat schon bemerkt, dass Blau bei schwächstem Lichte gesehen wird, Roth erst bei stärkerem. Später hat DOVE darauf aufmerksam gemacht, dass wenn man die Lichtstärke von Flächen, die mit verschiedenen Farben überzogen sind, bei verschiedener Beleuchtungsstärke vergleicht, bald die eine, bald die andere heller aussieht. Im allgemeinen überwiegen bei grosser Beleuchtungsstärke die weniger brechbaren rothen und gelben Farben, bei geringer Beleuchtungsstärke die brechbareren blauen und violetten Farben. Wenn ein rothes und blaues Papier bei Tageslicht gleich hell aussehen, so erscheint bei Einbruch der Nacht das blaue heller, das rothe oft ganz schwarz. Ebenso findet man, dass in Gemäldegallerien bei sinkendem Abend (einen trüben Himmel und fehlende Abend-Dämmerung vorausgesetzt) die rothen Farben zuerst schwinden, die blauen am längsten sichtbar bleiben. Und in der dunkelsten Nacht, wenn alle anderen Farben fehlen, sieht man noch das Blau des Himmels. Noch auffallender habe ich diese Erscheinungen gefunden, wenn man prismatische Farben benutzt. Wenn man den im vorigen Paragraphen beschriebenen in *Fig. 125* dargestellten Apparat zur Mischung von Spectralfarben benutzt, und vor das Feld, welches mit den beiden Farben beleuchtet ist, ein senkrechtes Stäbchen hält, so wirft dieses zwei verschiedenfarbige Schatten. Da nämlich die beiden farbigen Lichter in verschiedener Richtung, nämlich von den beiden Spalten des letzten Schirms ($S_{,}$ *Fig. 125*) her auf das erleuchtete Feld fallen, so entwirft jedes den betreffenden Schatten in verschiedener Richtung. Wäre also z. B. Violett und Gelb gemischt, so würden wir einen Schatten haben, der nicht vom Violett, wohl aber vom Gelb beleuchtet ist, und also gelb erscheint, einen anderen, der nicht vom Gelb,

[1] Zur Physiologie der Sinne. II. 109.

wohl aber vom Violett beleuchtet ist, und violett erscheint, während der Grund weiss oder weisslich wäre. Macht man nun den Spalt des Schirms breiter, welcher das Violett durchlässt, so wird das Violett, also auch der violette Schatten lichtstärker, und man kann durch eine passende Regulirung der beiden Spalten leicht bewirken, dass der violette Schatten dem Auge ebenso hell erscheint, wie der gelbe. Wenn man nun den einfachen Spalt des ersten Schirms, durch welchen das vom Heliostaten reflectirte Licht zum Prisma tritt, erweitert oder verengert, so verstärkt oder schwächt man die ganze Lichtmasse, die in den Apparat tritt, und zwar alle ihre einzelnen farbigen Lichter in gleichem Verhältnisse, so auch in gleichem Verhältnisse das Licht des gelben und violetten Schattens. Dabei ergiebt sich, dass schon bei einer geringen Verstärkung des Lichts das Gelb stärker, bei einer geringen Schwächung das Gelb schwächer als das Violett erscheint. Dieser Unterschied ist viel geringer, wenn man zwei Farben aus der weniger brechbaren Hälfte des Spectrum nimmt, grösser, wenn beide aus der brechbareren Hälfte sind, am grössten, wenn man sie von den Enden des Spectrum nimmt.

In *Fig. 128* mögen die horizontalen Coordinaten längs der Linie ad den objectiven Lichtstärken proportional sein, die verticalen der Intensität der Lichtempfindung. Es stelle $aeby$ die Curve für die Intensität der Empfindung des gelben Lichtes dar, und es seien die Einheiten des gelben und violetten Lichtes so gewählt, dass für die Lichtmenge ac die Empfindungsstärke in beiden Lichtarten die gleiche sei, so folgt aus den angegebenen Thatsachen, dass die Curve, welche die Empfindungsstärke des violetten Lichts ausdrückt, die Lage $a\varepsilon b\gamma$ gegen die frühere haben müsse. Verkleinert man beide Lichtmengen im Verhältniss $af : ac$, so findet man für das gelbe Licht die Empfindungsstärke, ausgedrückt durch die Linie fe, kleiner als die Empfindungsstärke $f\varepsilon$ des Violett. Umgekehrt, wenn man beide Lichtmengen auf die Grösse ad bringt, findet sich die zugehörige Empfindungsstärke des Gelb dg grösser, als die des Violett $d\gamma$.

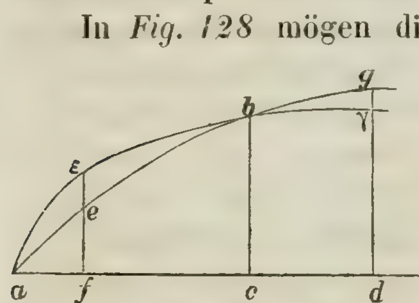


Fig. 128.

Es geht hieraus hervor, dass es nicht möglich ist, für verschiedenfarbiges Licht Maasseinheiten so festzusetzen, dass das Auge Quantitäten beider Lichter, welche nach diesen Maasseinheiten gemessen gleich gross sind, auch immer als gleich hell empfindet. Die Functionen, welche die Abhängigkeit der Empfindungsstärke von der objectiven Lichtstärke ausdrücken, sind vielmehr für verschiedenfarbiges Licht von verschiedenem Grade.

Wenn man aus zwei Spectralfarben Weiss zusammengesetzt hat, und nun die Intensität der beiden farbigen Lichter in gleichem Verhältniss vermehrt oder vermindert, sodass das Mischungsverhältniss unverändert bleibt, so bleibt auch die Mischfarbe unverändert weiss, trotzdem dabei das Verhältniss der Empfindungsstärke für die beiden gemischten sich wesentlich verändern kann. Mischt man z. B. in dem früher beschriebenen Apparate Violett und Grüngelb zu Weiss, so kann man mittels Verengerung des Spaltes die Menge des grüngelben Lichtes verringern, bis es gleich lichtstark, wie das Violett erscheint, und da die Menge

des durchgegangenen Lichts der Breite des Spaltes proportional ist, so kann man auch durch Messung des Spaltes das Verhältniss bestimmen, in welchem die Lichtmenge verringert worden ist. So habe ich gefunden, dass das Violett, welches mit einer gewissen Menge Grüngelb Weiss giebt, bei stärkerer Helligkeit so hell wie $^1/_{10}$ des Grüngelb, bei schwächerer Helligkeit dagegen wie $^1/_5$ des Grüngelb erscheint, während in beiden Fällen das Verhältniss der objectiven Lichtquanta das gleiche ist. In der Mischung von Indigblau und Gelb erschien das Blau bei grösserer Helligkeit so hell wie $^1/_4$, bei schwächerer wie $^1/_3$ des Gelb. Bei den weniger brechbaren Complementärfarben waren die Unterschiede zu klein, um gemessen zu werden. Wenn wir also Weiss von verschiedener Helligkeit zusammensetzen, so geschieht dies durch Lichtquanta der Complementärfarben, die ein constantes Verhältniss der objectiven Intensität, aber ein sehr wechselndes Verhältniss der subjectiven Helligkeit zu einander haben. Es folgt daraus, dass wenn wir die Maasseinheiten verschiedenfarbigen Lichtes, wie im vorigen Paragraphen ausgeführt wurde, nach den Mischfarben festsetzen, diese Einheiten wenig oder gar nicht von der Lichtstärke abhängig sein werden.

Dass die Mischfarben dem Auge bei verschiedener Lichtstärke ziemlich unverändert erscheinen, während doch das Verhältniss der Stärke, mit der die gemischten Farben auf den Sehnervenapparat wirken, sich wesentlich verändert, scheint mir daraus zu erklären zu sein, dass das Sonnenlicht, welches wir bei Tage als das normale Weiss betrachten, selbst bei verschiedener Lichtstärke in ähnlicher Weise seine Farbe ändern muss, wie die anderen weissen oder weisslichen Farbenmischungen, mit denen wir es vergleichen. Eine Farbenmischung, welche ebenso aussieht, wie das bis zu demselben Grade der Helligkeit abgeschwächte Sonnenlicht, ist für uns weiss. Wenn also auch in der betreffenden Farbenmischung bei schwachem Lichte der Eindruck des Blauen überwiegender ist, als bei starkem Lichte, so erscheint sie doch nicht bläulich weiss, weil in dem ebenso weit abgeschwächten Sonnenlichte der Eindruck des Blau ungefähr in demselben Maasse überwiegen muss. Dass aber wirklich im schwachen Sonnenlichte der Eindruck des Blau, im starken der des complementären Gelb überwiegt, davon überzeugt man sich leicht bei einiger Achtsamkeit. In Gemälden wird der Eindruck grellen Sonnenscheins immer durch überwiegend gelben Farbenton, Mondschein oder Sternenlicht durch blauen Ton ausgedrückt. Der Maler, welcher nicht über Abstufungen von Lichtstärke verfügen kann, wie die Natur, welche er nachahmt, sucht durch Nachahmung des veränderten Farbentons den Eindruck der Lichtstärke zu ergänzen. Ebenso gehört hierher, dass uns Landschaften bei trübem Wetter, durch ein gelbes Glas gesehen, den Eindruck einer grellen Sonnenbeleuchtung machen, während ein blaues Glas auch einer sonnenhellen Landschaft das Ansehen einer sogenannten kalten Beleuchtung giebt.

Schon oben ist erwähnt worden, dass auch der Eindruck der einfachen Farben sich in derselben Weise ändert, so dass sie sich bei steigender Lichtstärke gleichsam mit Gelb zu mischen scheinen. Roth und Grün gehen direct in Gelb über, Blau wird, wie es bei Mischung mit Gelb geschehen würde, weisslich.

Es folgt hieraus, dass bei sehr grosser Lichtintensität die Unterscheidung der Farbentöne unvollkommener ist, als bei mittlerer Helligkeit. Ebenso ist

diese Unterscheidung aber auch bei sehr geringer Lichtintensität unvollkommen, womit zusammenfällt, dass sie auch bei Farben, welche sehr kleine Theile des Gesichtsfeldes bedecken, unvollkommener ist, als bei breiteren Feldern. Wenn nämlich das Netzhautbild eines farbigen Feldes kleiner ist, als die empfindenden Netzhautelemente, so wird das betreffende Netzhautelement nicht mehr in voller Intensität erregt, und um so weniger, je kleiner der Theil des Elements ist, der vom Bilde der farbigen Fläche getroffen wird.

Die hier besprochenen Abänderungen der Farbenempfindung mit der Intensität des Lichtes erklären sich aus der Annahme von Th. Young, dass es dreierlei Arten von Nerven in der Netzhaut gebe, rothempfindende, grünempfindende, violettempfindende, sobald man, wie wir gethan, annimmt, dass von allem Licht, auch von homogenem, jede Art von Nerven erregt, aber in sehr verschiedener Stärke erregt werde, und dass in den drei Arten von Nerven die Empfindungsstärke eine verschiedene Function der Lichtstärke sei, so dass sie in den violettempfindenden Nerven bei steigender Intensität anfangs schneller, später langsamer wachse, als in den grünempfindenden, in diesen ebenso im Vergleich mit den rothempfindenden.

Erregt das violette Licht des Spectrum stark die violettempfindenden, schwach die grünempfindenden, noch schwächer die rothempfindenden Nerven, so wird bei schwachem Lichte die Empfindung des Violett überwiegen; bei starkem Lichte, wo sich die Empfindung des Violett ihrem Maximum nähert, wird die Empfindung des Grün im Vergleich zu jener eine merklichere Grösse gewinnen können, später auch jene des Roth, so dass anfangs die Empfindung des violetten Lichts durch zugemischtes Grün in Blau, später durch zugemischtes Grün und Roth in Weiss übergehen muss.

Wenn wir ferner annehmen, dass die grünen Strahlen des Spectrum stark die grünempfindenden Nerven, mässig die rothempfindenden und violettempfindenden erregen, so muss die Empfindung des Grün erst in Gelb übergehen, weil die Empfindung des Roth mit der Lichtstärke schneller zunimmt, als die des Violett, endlich wenn sich alle drei dem Maximum nähern, in Weiss. Ferner haben wir für die rothen Strahlen angenommen, dass sie stark die rothempfindenden Nerven, schwach die grünempfindenden, noch schwächer oder gar nicht die violettempfindenden erregen; daraus würde sich erklären, dass die Empfindung starken rothen Lichtes in Gelb übergeht.

Die Unterscheidung des Farbentons würde nun darauf beruhen, dass das Verhältniss der Lichtmenge, welche jeden von diesen Nerven erregt, durch Vergleichung ihrer Empfindungsstärke wahrgenommen wird. Nun haben wir gesehen, dass das Intensitätsverhältniss zweier Lichtmengen sich bei einer gewissen mittleren Helligkeit am besten vergleichen lässt, daher auch die Unterscheidung der Farbentöne bei mittlerer Helligkeit am genauesten sein muss. Die Anwendung dieser Betrachtung auf sehr lichtstarke Farben wird aus dem bisher Gesagten schon klar sein. Wenn bei gemischten Farben alle drei Nervenarten dem Maximum ihrer Erregung nahe sind, wird nothwendig jede Farbe sich dem Weiss immer mehr nähern müssen. Nehmen wir im Gegentheil an, dass die violettempfindenden Nerven in den schwächsten wahrnehmbaren Grad

von Erregung versetzt seien, so wird nicht unterschieden werden können, ob daneben noch ein etwas geringerer Grad von Erregung der beiden anderen Nerven vorhanden sei, ob also die Farbe des Lichts reinem Violett, oder Indigblau oder Purpur oder bläulichem Weiss entspreche, und somit wird also auch bei ganz schwachem Lichte die Unterscheidung des Farbentons unvollkommen sein.

Daraus, dass die Empfindungsstärke der objectiven Lichtstärke nicht proportional ist, erklärt sich nun weiter eine Reihe von Thatsachen, welche man bisher unter dem Namen der Irradiation zusammengefasst hat, und welche das Gemeinsame haben, dass stark beleuchtete Flächen grösser erscheinen, als sie wirklich sind, während die benachbarten dunkeln Flächen um ebenso viel kleiner erscheinen

Die Erscheinungen selbst sind nach der Form der betrachteten Figuren sehr mannigfaltig, sie sind im Allgemeinen am leichtesten sichtbar und am stärksten, wenn die Accommodation des Auges für den betrachteten Gegenstand nicht genau ist, einerlei ob derselbe zu fern oder zu nah ist, oder man das Auge mit einer Glaslinse, concav oder convex, bewaffnet, welche für die Entfernung des Gegenstandes nicht passt. Aber die Irradiation fehlt auch nicht ganz, wenn die Accommodation genau ist, und ist auch dann bei sehr hellen, namentlich kleinen Gegenständen deutlich zu bemerken, bei kleinen Gegenständen offenbar deshalb, weil deren Grösse durch die schmalen Zerstreuungskreise relativ mehr vergrössert wird, als die grösserer Gegenstände, gegen deren Dimensionen die Breite so schmaler Zerstreuungskreise, wie sie das gut accommodirte Auge liefert, verschwindet.

1) Helle Flächen erscheinen vergrössert. Die Grösse von engen Löchern oder Spalten, durch welche helles Licht fällt, beurtheilen wir niemals richtig, sie erscheinen uns immer breiter, als sie wirklich sind, auch bei schärfster Accommodation. Ebenso erscheinen auch die Fixsterne als kleine helle Flächen, selbst wenn man sie durch ein Concavglas betrachtet, welches genaue Accommodation möglich macht. In einem Gitter aus feinen dunkeln Stäben mit Zwischenräumen, welche genau ebenso breit sind wie die Stäbe, (gewöhnliche Drahtgitter zu Interferenzversuchen) erscheinen vor einem hellen Hintergrunde die Zwischenräume stets breiter als die Stäbe. Kommt ungenaue Accommodation hinzu, so sind die Erscheinungen viel auffallender und werden auch an grösseren Objecten sichtbar. *Fig. 129* zeigt ein weisses Quadrat auf schwarzem Grunde und ein schwarzes auf weissem Grunde. Bei starker Beleuchtung und unzureichender Accommodation wird das weisse grösser erscheinen, obgleich beide genau gleich gross sind.

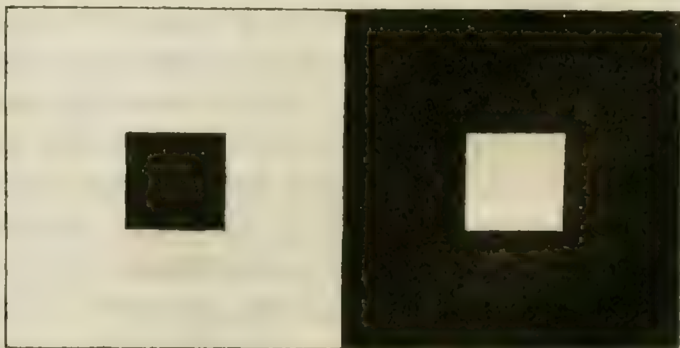


Fig. 129.

2) Nahe liegende helle Flächen fliessen zusammen. Ein feiner Draht, welchen man zwischen das Auge und die Sonnenscheibe oder eine helle Flamme

hält, verschwindet, indem die beiden hellen Flächen, die im Gesichtsfelde neben ihm liegen, von beiden Seiten her übergreifen und zusammenfliessen. Bei Mustern, die aus schwarzen und weissen Quadraten ähnlich dem eines Schachbretts zusammengesetzt sind, wie *Fig. 130*, fliessen durch die Irradiation die weissen Felder an den Ecken zusammen, und trennen die schwarzen. PLATEAU hat Felder von der Art wie *Fig. 130* auch zur Messung der Breite der Irradiation benutzt. Aus einem dunkeln Schirme waren die weissen Felder ausgeschnitten und von hinten erleuchtet, von den beiden schwarzen Feldern war eines durch eine Schraube horizontal verschiebbar, und wurde so eingestellt, dass dem Beobachter die beiden mittleren verticalen Grenzlinien in eine zusammenzufallen schienen. Für grössere Entfernungen waren die schwarzen Felder aus Brettchen, für kleinere aus Stahlplättchen verfertigt. Der Fehler, welcher bei der Einstellung begangen war, bezeichnete die Breite der Irradiation.

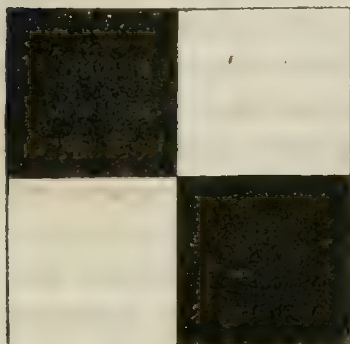


Fig. 130.

3) Gerade Linien werden unterbrochen. Wenn man die Kante eines Lineals zwischen das Auge und eine helle Lichtflamme oder die Sonne hält, so erscheint das Lineal an der Stelle, wo der helle Körper darüber hervorblickt, einen Ausschnitt zu haben, wie *Fig. 131* darstellt. Ich mache für den letzteren Fall gleichzeitig darauf aufmerksam, dass wenn der helle Körper eine Lampenflamme mit cylindrischem Dochte ist, der Einschnitt an den Rändern der Flamme, welche, wie oben erwähnt, eine grössere absolute Helligkeit haben, tiefer erscheint als in der Mitte der Flamme, trotzdem das Auge die grössere Helligkeit der Ränder nicht als solche empfindet.

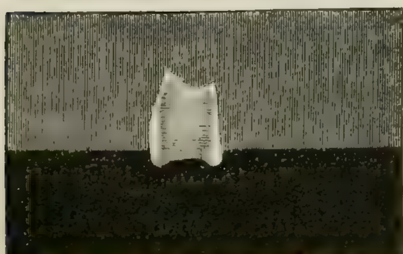


Fig. 131.

Alle diese Erscheinungen reduciren sich darauf, dass die Ränder heller Flächen im Gesichtsfelde sich gleichsam vorschieben und über die benachbarten dunkleren Flächen übergreifen. Sie greifen desto mehr über, je ungenauer die Accommodation ist, je grössere Zerstreuungskreise also ein jeder lichte Punkt der Fläche im Auge entwirft. Nun wissen wir aber, dass auch bei genauster Accommodation die Zerstreuungskreise nicht ganz fehlen wegen der Farbenzerstreuung und der übrigen Abweichungen des Auges, die wir in §. 14 unter dem Namen der monochromatischen Abweichungen des Auges zusammengefasst haben. Durch diese Zerstreuungskreise wird nun bewirkt, dass am Rande des Netzhautbildes einer hellen Fläche Licht sich weiter verbreitet, als das geometrische Bild der Fläche reicht, aber auch die Dunkelheit greift über den Rand des Bildes, d. h. das Licht fängt schon innerhalb des Randes, wo es noch seine volle Stärke haben sollte, an abzunehmen. Es sei in *Fig. 132* (Seite 323) c ein Punkt des Randes einer hellen Fläche, bg eine senkrecht gegen den Rand gezogene gerade Linie. Senkrecht gegen dieselbe seien Coordinaten aufgetragen, welche der objectiven Helligkeit in den entsprechenden

Punkten von bg proportional sind. Wäre das Bild der Fläche vollkommen genau, so würde die gebrochene Linie $adcg$ die Grösse der Helligkeit ausdrücken. Von b bis zum Rande der Fläche bei c würde nämlich die Fläche die constante Helligkeit H haben, von c ab nach g zu die Helligkeit 0. Wenn durch Mangel der Accommodation Zerstreuungskreise gebildet werden, so nimmt dagegen, wie oben Seite 135 gezeigt ist, die Helligkeit ab wie die Curve afg. Es greift dabei sowohl das Helle über das Dunkle über in cg, als das Dunkle über das Helle in ad, und so viel Licht sich über den Rand hinaus verbreitet, muss natürlich innerhalb des Randes der hellen Fläche entzogen werden. So lange wir nur die objective Helligkeit berücksichtigen, würden also die hellen Flächen durch die Zerstreuungskreise nicht vergrössert erscheinen können. Im Gegentheil die Fläche, welche die volle Helligkeit zeigt, ist durch die Zerstreuungskreise kleiner geworden, wenn auch die Fläche, welche überhaupt Licht empfängt, grösser geworden ist. Berücksichtigen wir nun aber, dass die Lichtempfindung für die höheren Stufen der objectiven Helligkeit gar nicht oder wenig verschieden ist, so folgt daraus, dass die Verminderung des Lichts innerhalb der Fläche weniger bemerkt werden wird, als die Erleuchtung vorher dunkler Stellen jenseits ihres Randes, sodass also für die Empfindung die Ausbreitung des Hellen allein, und nicht die des Dunkels vergrössert erscheinen muss. Am auffallendsten wird die Erscheinung sein, wenn die Fläche hell genug ist, dass innerhalb der Zerstreuungskreise die Lichtempfindung schon ihr Maximum erreicht. Wäre das z. B. in *Fig. 132* bei h der Fall, so würde die scheinbare Helligkeit bei h nicht mehr von der vollen Helligkeit im Innern der Fläche zu unterscheiden sein. Die volle Helligkeit der Fläche würde also bis h zu reichen scheinen und auch jenseits h erst sehr langsam abnehmen, ehe sie bei g ganz verschwindet. Daraus erhellt auch, warum für das zu Stande kommen der Irradiation grosse Helligkeit vortheilhaft ist. Desto näher nämlich an g liegt die Stelle, wo das Maximum der Lichtempfindung erreicht wird. Daraus erklärt sich auch, warum bei gesteigerter Helligkeit des Grundes, selbst wenn die Empfindung dieser Helligkeit dabei nicht weiter steigen kann, doch die Irradiation noch wächst. Proportional der Ordinate H wachsen nämlich bei gesteigerter objectiver Lichtstärke sämmtliche Ordinaten der Curve ag, und desto näher an g rückt also auch die Ordinate, welche der für das Maximum der Empfindung genügenden Helligkeit entspricht. Messende Versuche über den Einfluss der Helligkeit hat Plateau ausgeführt, und dabei gefunden, dass die Grösse der Irradiation nicht proportional der Helligkeit wächst, sondern in einem geringeren Maasse, und bei steigender Helligkeit sich asymptotisch einem Maximum nähert, wie es auch aus unserer Erklärung folgt.

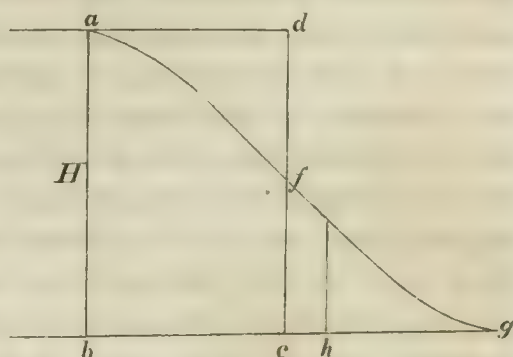


Fig. 132.

Es ergiebt sich ferner aus dieser Theorie, warum die Irradiation desto breiter wird, je grössere Zerstreuungskreise sich bilden.

Da bei den meisten Personen die Zerstreuungskreise eines zu fernen

Punkts nach der Höhe grösser sind, als nach der Breite, erscheinen helle Quadrate auf dunklem Grunde in einer für die Accommodation etwas zu grossen Entfernung perpendiculär verlängert, und schwarze Quadrate auf weissem Grunde horizontal verlängert. Die perpendiculäre Verlängerung weisser Quadrate sehen die meisten Personen auch bei genauer Accommodation, weil sie, wie es scheint, dann für die Verticallinien accommodiren. Dagegen erscheinen weisse Rechtecke, deren horizontale Seite etwas länger ist als die verticale, wie Quadrate. Nach den Versuchen von A. Fick [1] erschien einem geübten, nicht kurzsichtigen Auge bei 4500^{mm} Abstand ein Rechteck von 22 Mm. horizontaler und 20 Mm. verticaler Seite als Quadrat, eines von 21 Mm. horizontaler und 20 Mm. verticaler Seite als vertical verlängertes Rechteck. In anderen Augen, denen ein ferner Lichtpunkt dreistrahlig erscheint, machen sich auch in den anderen Fällen von Irradiation drei Hauptrichtungen bemerklich, in denen sie am stärksten ist, wie es Joslin [2] beschreibt.

Ich habe in dem Vorstehenden den Namen der Irradiation nur auf diejenigen Fälle angewendet, wo man nicht die Zerstreuungskreise als solche wahrnimmt, sondern wo sich scheinbar die Fläche, welche die volle Beleuchtungsstärke hat, vergrössert. Indessen ist in neuester Zeit der Name der Irradiation auf die Bildung der Zerstreuungskreise überhaupt angewendet worden, auch wo man diese als lichtschwächere Theile des Bildes erkennt. Es ist aber wohl unnöthig, auf diese Fälle einen besonderen neuen Namen anzuwenden. Es können übrigens auch durch die Zerstreuungskreise neue Begrenzungslinien entstehen, welche das Object in veränderter Grösse erscheinen lassen, ohne dass die Lichtstärke noch einen besonderen Einfluss hätte. Namentlich hat Volkmann [3] gefunden, dass sehr feine schwarze Fäden auf weissem Grunde ebenso wie weisse auf dunklem Grunde für breiter gehalten werden, als sie sind, während die bisher betrachtete Art der Irradiation immer nur das Hellere vergrössert. Volkmann benutzte Fäden von 0,0445 Mm. Dicke in 333 Mm. Entfernung vom Auge, welche demgemäss dem Auge viel kleiner erscheinen mussten, als die kleinsten wahrnehmbaren Distanzen. Er hatte ein Schraubenmikrometer so einrichten lassen, dass die Fäden langsam einander genähert werden konnten, und stellte dem Experimentirenden die Aufgabe, die Fäden so zu stellen, dass der Zwischenraum ebenso breit sei, wie die Fäden. Alle Individuen machten aber den Zwischenraum zu breit, und zwar auch, wenn er hell war, und die Fäden dunkel. Volkmann giebt davon die Erklärung, dass man statt der schmalen schwarzen Streifen breitere graue Zerstreuungsbilder derselben sehe, denen man dann den mittleren hellen Zwischenraum gleich mache. Er benutzt deshalb auch diese Messungen, um die Breite der Zerstreuungsbildchen bei guter Accommodation zu bestimmen. Er selbst machte den Zwischenraum im Mittel gleich 0,207 Mm., während die Dicke der Fäden, denen derselbe gleich sein sollte, nur 0,0445 Mm. betrug, und berechnet daraus die Breite des Zerstreuungsbildes auf der Netzhaut gleich 0,0035 Mm., bei anderen Personen bei hellem Hintergrund schwankt diese letztere Grösse zwischen 0,0006 und 0,0025. Diese Grössen sind kleiner als die kleinsten

[1] Henle und Pfeuffer. Zeitschrift für rationelle Medicin. Neue Folge II. S. 83.
[2] Pogg. Ann. LI. Ergänzbd. S. 107.
[3] Berichte der sächsischen Ges. d. Wiss. 1857. S. 129—148.

sichtbaren Abstände (0,0044 Mm.) und als die Zapfen des gelben Flecks (0,0045 bis 0,0054), sodass möglicher Weise die letzteren die Breite des schwarzen Bildes bestimmt haben können. Dass so grosse Unterschiede in den Einstellungen vorkamen, darf bei einer so subtilen Aufgabe wohl nicht wundern.

Aber auch schwarze Streifen von erkennbarer Breite, welche bei so ungenügender Accommodation betrachtet werden, dass die Zerstreuungskreise viel breiter sind, als die Streifen, erscheinen breiter als sie sind. Dies scheint mir auf der Vertheilung des Lichts in dem Zerstreuungskreise zu beruhen. Es sei *Fig. 133* ab der Durchschnitt eines Papierblatts, auf welches eine schwarze Linie gezeichnet ist, die hier im Querschnitt als Punkt c erscheint. Es mögen durch mangelhafte Accommodation Zerstreuungskreise vom Radius fc entstehen, so wird die Curve der Lichtstärke, in der die einzelnen Punkte der Linie ab im Netzhautbilde erscheinen, nach den in §. 13 entwickelten Principien und abgesehen von den Störungen durch Asymmetrie der Linse ausgedrückt durch die Linie $\alpha\varphi\gamma\delta\beta$. Hier erleidet nun die Lichtstärke bei φ und δ einen plötzlichen Abfall, und diese Stellen erscheinen deshalb als Grenzlinien. Wäre die Linie c weiss auf schwarzem Grunde, so würde $\alpha\beta$ als Abscissenlinie zu nehmen sein, und die negativen Ordinaten der Curve $\varphi\gamma\delta$ würden die Lichtstärke ausdrücken; auch dann haben wir bei f und d einen plötzlichen Abfall der Lichtstärke. Davon übrigens, dass solche Linien, in denen der Differentialquotient der Lichtstärke unendlich gross wird, als Grenzlinien erscheinen, kann man sich mittels der rotirenden Scheibe überzeugen. Wenn man eine weisse Scheibe mit einem runden kreisförmigen Flecke, wie *Fig. 134*, rotiren lässt, so erscheint der schwarze Fleck bei schneller Bewegung wie ein grauer Kreis, dessen Lichtintensität durch eine ganz ähnliche Curve wie $\alpha\varphi\gamma\delta\beta$ *Fig. 133* auszudrücken sein würde, wie aus den im folgenden Paragraphen zu entwickelnden Gesetzen hervorgeht. Der graue Kreis erscheint dabei ganz scharf begrenzt an beiden Seiten, und in seinem Innern bemerkt man kaum die ungleichen Grade der Helligkeit; der Streifen erscheint vielmehr fast gleichmässig grau gefärbt. Uebrigens mischen sich in die Zerstreuungsbilder schmaler schwarzer Streifen meist mehr oder weniger die Doppelbilder ein, welche durch Asymmetrie der Linse entstehen (*Fig. 66*), wobei die Lichtvertheilung im Zerstreuungsbilde zwar verändert wird, aber doch jedenfalls die grössere Breite des Bildes bestehen bleibt.

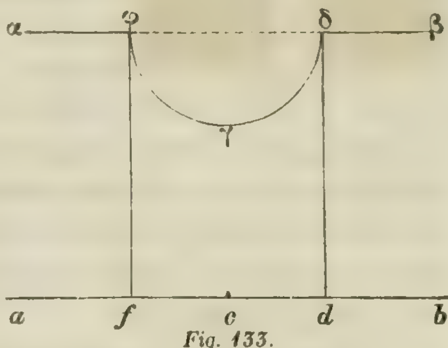
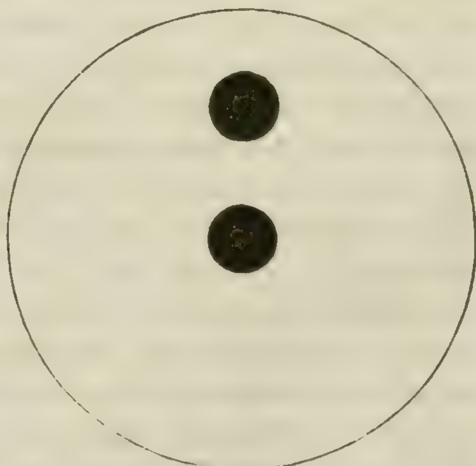


Fig. 133.


Fig. 134

Sobald der schwarze Streifen nicht mehr sehr schmal ist gegen die Breite der Zerstreuungsbilder, so nimmt auch die Helligkeit an seinem Rande allmälig

ab, wie in *Fig. 132*, und dann erscheinen seine Ränder verwaschen grau, seine Mitte schwarz. Man erkennt alsdann das Vorhandensein von Zerstreuungskreisen und die Täuschung schwindet. Der Unterschied zeigt sich sehr auffallend in einem von Volkmann angegebenen Versuche. Man betrachte die *Fig. 135* aus solcher Entfernung, dass die Accommodation beträchtlich mangelhaft ist, so wird man finden, dass der mittlere weisse Streifen, der überall gleiche Breite hat, eine keulenförmige Gestalt bekommt, indem das zwischen den breiten schwarzen Flächen stehende Ende breit wird, das zwischen den schmalen schwarzen Streifen stehende dagegen schmaler wird und gleichsam den Griff der Keule bildet. Zwischen den breiten schwarzen Flächen breitet sich der weisse Streifen durch die gewöhnliche Art der Irradiation aus. Die schmalen schwarzen Streifen dagegen verwandeln sich in breitere graue, und beeinträchtigen dadurch die Breite des zwischen ihnen liegenden mittleren Weiss. Plateau hat ähnliche Phänomene beschrieben, daraus aber geschlossen, dass die Irradiation zweier benachbarter weisser Ränder sich gegenseitig beschränke.

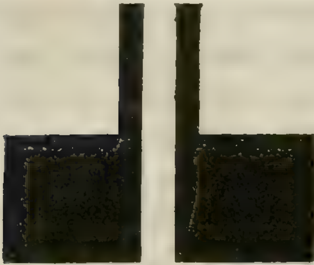


Fig. 135.

Diese zuletzt beschriebenen Phänomene der Ausbreitung dunkler Streifen sind deshalb einfache Fälle von Zerstreuungsbildern, unabhängig von der Beleuchtungsstärke und von dem Gesetze der Empfindungsstärke. Ich würde deshalb vorziehen den Namen der Irradiation nicht auf sie anzuwenden, sondern diesen zu beschränken auf diejenigen Fälle, wo die Erscheinung von der Beleuchtungsstärke abhängt.

Eine sehr grosse Anzahl von Physikern und Physiologen hat eine andere Erklärung der Irradiationserscheinungen angenommen, welche namentlich von Plateau vertheidigt und ausführlich durchgeführt ist. Danach wird angenommen, dass in der Netzhaut eine erregte Nervenfaser die Fähigkeit habe, den Zustand der Reizung auch in den benachbarten Fasern hervorzurufen, so dass auch diese Lichtempfindung veranlassen, obgleich sie von keinem objectiven Lichte getroffen werden. Es würde dies ein Fall sogenannter Mitempfindung sein. Dergleichen Mitempfindungen kommen bei anderen sensiblen Nerven vor. Viele Personen empfinden z. B. Kitzel in der Nase, wenn heftiges Licht in ihr Auge fällt, empfinden ein kaltes Ueberlaufen in der Haut des Rumpfes, wenn sie kreischende oder quietschende Töne hören. In diesen und anderen Fällen kann die Uebertragung der Reizung von der primär erregten Nervenfaser auf die andere erst innerhalb der Centralorgane geschehen, da der Sehnerv mit den sensiblen Nerven der Nase (*Nervus trigeminus*) und der Hörnerv mit den Hautnerven des Rumpfes keine andere anatomische Communication hat, als durch die Centralorgane. Uebrigens kommen dergleichen Mitempfindungen immer nur in ziemlich vereinzelten Beispielen vor, und die angeführte Deutung derselben kann nicht als fest begründet angesehen werden, weil möglicher Weise auch reflectorische Entladungen nach den absondernden Drüsen der Nase oder den Gefässmuskeln der Hautgefässe ähnliche Empfindungen mittelbar hervorrufen könnten. Dass in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle die Erregung einer

sensiblen Faser nicht auf andere Fasern übertragen wird, geht schon aus der allgemeinen Erfahrung hervor, wonach wir die einzelnen Eindrücke, welche auf unsere Sinnesorgane geschehen, eben isolirt empfinden können. Wird eine Hautstelle gestochen, dadurch die zugehörige Nervenfaser erregt, so würden ausgebreitete Schmerzempfindungen in vielen Stellen der Haut entstehen müssen, wenn die Ueberleitung auf andere Nervenfasern regelmässig und constant vorkäme. Wir würden dann die primär erregte Stelle von den secundär erregten nicht unterscheiden können. In der Regel empfinden wir nun Reizung einer einzelnen Hautstelle eben nur in der gereizten Stelle, und sonst nirgends; es treten also keine Mitempfindungen ein. Wenn aber der örtliche Schmerz sehr heftig ist und sehr lange dauert, so treten allerdings auch Schmerzen in den benachbarten Theilen ein, welche gewöhnlich als Mitempfindungen gedeutet werden, aber freilich auch von der Ausbreitung der schmerzerregenden Schädlichkeit oder der Entzündung herrühren können. Plateau erinnert auch an die Thatsache, dass, wenn das Bild eines auf weisses Papier gezeichneten schwarzen Flecks auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, in der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes nur Weiss empfunden wird, und nimmt auch hier eine Ausbreitung der Erregung über die Eintrittsstelle des Sehnerven an. Dass aber diese Erscheinung ganz anderer Art ist, werden wir später zeigen. Wenn man also die Irradiation im Auge als Mitempfindung auffassen will, so würde diese Ansicht sich doch nur auf selbst noch zweifelhafte Analogien in andern Theilen des Nervensystems stützen müssen. Andererseits sind die Erscheinungen der Irradiation im Auge alle der Art, dass immer auch objectives Licht auf die Theile der Netzhaut fällt oder fallen kann, wo man die Mitempfindung vermuthet. Die Stärke der Irradiation ist durchaus der Grösse der Zerstreuungskreise proportional und die ganze Erscheinung lässt sich mit allen ihren Einzelheiten aus anderen wohl festgestellten Erklärungsprincipien herleiten, sodass ich es für ungerechtfertigt halte, in einem solchen Falle neue, und in sich nicht sicher gestellte Principien der Erklärung zu Hülfe zu nehmen.

Wir müssen hier noch Rechenschaft geben über die Methoden der Photometrie, soweit dabei die physiologischen Eigenschaften des Auges in Betracht kommen. Wir sehen dabei ab von allen Methoden, wobei die Vergleichung der Helligkeiten nicht durch das Auge, sondern durch die photochemischen Wirkungen, oder die absorbirte Wärme geschieht. Dabei ist zu bemerken, dass das Auge sehr wohl gebraucht werden kann, um zwei Lichtmengen von gleicher Qualität, z. B. zwei Mengen weissen Lichtes, oder zwei Mengen von derselben einfachen Farbe unter einander zu vergleichen. Denn wenn zwei Lichtmengen gleicher Qualität das Auge unter gleichen Umständen gleich stark afficiren, dürfen wir schliessen, dass auch ihre objective Intensität gleich gross sei. Für solche Fälle dürfen wir das Auge als ein bequemes und empfindliches Reagens anwenden, und können uns unabhängig machen von den besonderen Eigenschaften dieses Reagens, so dass wir objectiv gültige Resultate erhalten. Dieser Theil der Photometrie gehört also eigentlich nicht in die physiologische Optik hinein, nach der S. 30 von uns aufgestellten Begrenzung dieser Wissenschaft. Wir wollen ihn hier eben auch nur so weit besprechen, als die physiologischen Eigenthümlichkeiten des Auges von Einfluss sind auf die Empfindlichkeit der photometrischen Messungen.

Dagegen ist streng festzuhalten, was aus den oben angeführten Thatsachen klar genug hervorgeht, dass jede Vergleichung verschiedenfarbigen Lichtes durch das Auge nur einen

physiologischen Werth hat, und nichts aussagt über die objective Stärke des verglichenen Lichts, so dass dergleichen photometrische Messungen durchaus innerhalb des Gebietes der physiologischen Optik bleiben.

Im Allgemeinen ist das Verfahren in der Photometrie folgendes. Wenn das Verhältniss zweier Helligkeiten A und B bestimmt werden soll, schwächt man die Intensität der helleren, welche B sein mag, mittels irgend einer Methode, die zu bestimmen erlaubt, in welchem Verhältnisse B geschwächt worden ist, bis B ebenso hell erscheint als A. Es sei durch die Schwächung die Helligkeit B geworden nB, wo n ein ächter Bruch von bekannter Grösse sein muss, so ist

$$A = nB$$

und dadurch das Verhältniss von A zu B bestimmt. Die verschiedenen photometrischen Methoden unterscheiden sich nun zunächst dadurch von einander, dass sie verschiedene Mittel anwenden, um das hellere Licht in einem bekannten Verhältnisse zu schwächen; die zu wählende Methode wird in dieser Beziehung immer hauptsächlich von der Natur der Aufgabe abhängen müssen. Sie unterscheiden sich dann aber auch durch die Art und Weise, wie dem Auge des Beobachters die beiden Helligkeiten zur Vergleichung dargeboten werden, und in dieser Beziehung ist zu bemerken, dass das Auge die Helligkeiten zweier Flächen am feinsten unterscheidet, wenn die beiden Flächen unmittelbar an einander stossen, und ihre Grenzlinie durch nichts weiter bezeichnet ist, als durch den Unterschied ihrer Helligkeit. Auch scheint die Empfindlichkeit noch zu wachsen, wenn die beiden Flächen nicht durch eine einfache gerade Linie getrennt sind, sondern die eine in der anderen eine complicirtere Zeichnung (Ringe, Buchstaben u. s. w.) bildet mit mehrfachen Abwechselungen von Hell und Dunkel. Endlich müssen die zu vergleichenden Flächen auch eine gewisse, nicht zu kleine räumliche Ausdehnung haben. Sehr viel unvortheilhafter sind natürlich diejenigen Methoden, bei denen eine Lichtstärke dadurch gemessen wird, dass man ihren Eindruck auf das Auge durch irgend ein Mittel so abschwächt, bis er verschwindet. Denn offenbar sind die Grenzen der Empfindlichkeit des Auges nicht so bestimmt und so constant, um darauf Messungen begründen zu können. Unter verschiedenen Umständen (Stärke der Beleuchtung, Bewegung u. s. w.) erkennt dasselbe Auge bald eine Differenz von $\frac{1}{60}$, bald von $\frac{1}{120}$ der Lichtstärke. Machen wir die Empfindlichkeit des Auges also zum Massstab, so würden wir in zwei solchen Fällen Lichtmengen als gleich setzen, von denen die eine doppelt so gross ist als die andere, oder vielleicht noch mehr.

Bouguer [1] liess zwei weisse Flächen durch die zu vergleichenden Lichter beleuchten, stellte sich so, dass er sie beide perspectivisch neben einander sah, und veränderte dann die Entfernung der einen weissen Fläche vom Licht so lange, bis die Erleuchtung gleich wurde. Lambert, der in seinem berühmten Werke Photometria [2] das erste vollständige System der theoretischen Photometrie mit bewundernswerthem Scharfsinn und Erfindungskraft hinstellte, wendete neben verschiedenen anderen Methoden, die einzelnen Zwecken angepasst waren, namentlich das Verfahren an, durch zwei Lichter eine weisse Fläche erleuchten zu lassen, einen undurchsichtigen Stab davor zu bringen, der zwei Schatten wirft, und dann die Entfernung des einen Lichts so lange zu verändern, bis die beiden Schatten gleich hell sind. Dasselbe Verfahren wendete auch Rumford [3] an, und wurde der dazu nöthige Apparat unter dem Namen des Rumford'schen Photometers bekannt. Um die Stellung des Beobachters bequemer zu machen, wendete Potter [4] statt der zwei weissen undurchsichtigen Flächen zwei transparente an, und Ritchie [5] fügte noch zwei unter 45° geneigte Spiegel hinzu, welche das Licht auf die weissen Flächen warfen, und erlaubten die Lichtquellen nach entgegengesetzten

---

[1] *Essai d'Optique 1729 in 12 mo. — Traité d'Optique sur la gradation de la lumière.* Paris 1760. Latein. Uebersetzung Wien 1762.

[2] Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae. Augustae Vindelicorum 1760.

[3] *Philos. Transact.* LXXXIV. p. 67.

[4] *Edinb. Journal of Science.* New Ser. III. 284.

[5] *Annals of Philosophy.* Ser. III. Vol. I. 174.

Richtungen hin aufzustellen. J. Herschel [1] hob hervor, dass die Bedingung inniger Berührung der zu vergleichenden Flächen in Ritchie's Photometer erfüllt sei, und dadurch die Genauigkeit zunehme. Uebrigens leidet die Anwendung des Gesetzes, dass die Erleuchtung dem Quadrate der Entfernung umgekehrt proportional sei, in diesen Fällen an zwei Störungsursachen. Erstens nämlich muss bei der Anwendung dieses Gesetzes die Ausdehnung der Lichtquelle als unendlich klein gegen ihre Entfernung von der beleuchteten Fläche vorausgesetzt werden, und das ist nicht der Fall, wenn man grosse Lichtintensitäten braucht, und das Licht sehr nähern muss. Zweitens dürfen, namentlich bei weit entferntem Lichte im Hintergrunde des Zimmers keine merklich erleuchteten Gegenstände sich finden, und diese Bedingung wird bei Versuchen im Zimmer immer schwer zu erfüllen sein. Pernot [2] modificirte das Verfahren von Potter dadurch, dass er die beiden transparent beleuchteten Flächen noch von der entgegengesetzten Seite durch ein drittes Licht beleuchtet, welches er allmälig näher bringt. Sind jene beiden gleich, so müssen sie gleichzeitig verschwinden. In Bunsen's Photometer wird eine Papierfläche, die zum Theil mit Stearin getränkt ist, von vorn und von hinten beleuchtet. Ist das hintere Licht schwach, so erscheint der transparente Fleck dunkel, ist es zu stark, hell.

Die Absorption der Lichtstrahlen zur Schwächung benutzte de Maistre [3], der ein Prisma von blauem Glase mit einem gleichen von weissem Glase so zusammenlegte, dass die äusseren Begrenzungsflächen parallel wurden, und das Licht ungebrochen durchging, aber an verschiedenen Stellen des Doppelprisma verschieden stark absorbirt wurde. Aehnlich benutzte Quetelet [4] zwei Prismen aus blauem Glase, die verschieden gegen einander verschoben eine planparallele Platte von veränderlicher Dicke bildeten. Durch die hierbei angewendeten blauen Glasplatten wird aber die Farbe des hindurchgehenden Lichtes verändert, und dass bei der Vergleichung verschiedenfarbigen Lichts keine genaue Messung möglich sei, ist schon erwähnt worden. Noch misslicher sind zwei andere Instrumente, bei welchen nicht zwei verschiedene Lichter verglichen, sondern absolute Lichtstärken dadurch bestimmt werden sollen, dass sie bei bestimmter Grösse der Absorption ganz verschwinden. Das eine ist von Lampadius [5] vorgeschlagen. Er sieht durch eine Anzahl dünner Hornblätter nach dem hellen Gegenstande und vermehrt sie so lange, bis das Object eben verschwindet. de Limencey und Secretan [6] brauchten statt der Hornblätter Papierscheiben. Das andere ist das von einem Ungenannten [7] vorgeschlagene Lamprotometer, um die Helligkeit des Tages zu messen. Es wird dabei bestimmt, wie starke Lackmustinctur man nehmen müsse, damit ein vom Tageslicht beleuchteter Platindraht durch ein mit der Tinctur gefülltes Glas gesehen verschwinde. Die Grenze der Empfindlichkeit des Auges für Licht ist doch zu unbestimmt, als dass bei solchen Messungen nicht Irrungen um das Dreifache oder mehr der gemessenen Grösse eintreten sollten. Auf demselben Princip beruht ein Photometer von Albert [8] und eines von Pitter [9].

Dagegen waren es zwei andere Wege, auf denen allmälig die vollendeteren Methoden, welche jetzt üblich sind, sich entwickelten. Der eine dieser Wege hat Bestimmung der Helligkeit der Sterne zum Ziel. J. Herschel schwächte das Licht des helleren Sterns, indem er die Apertur des Fernrohrs, welches auf ihn gerichtet war, durch ein vorgesetztes Diaphragma verkleinerte. Dasselbe Princip liegt auch A. v. Humboldt's Astrometer zu Grunde. Dies ist ein Spiegelsextant von gewöhnlicher Einrichtung. Das Fernrohr des Instruments ist bekanntlich auf einen halb belegten, halb unbelegten Spiegel gerichtet und sieht den einen Stern durch den unbelegten Theil, den anderen durch den belegten und einen zweiten Spiegel. Indem

[1] *On light.* p. 29.
[2] Dingler's polyt. Journ. CXIX. 155. *Moniteur industr.* 1850. Nr. 1509.
[3] *Bibl. univ. de Genève.* LI. 323. Pogg. Ann. XXIX. 187.
[4] *Bibl. univ. de Genève.* LII. 212. Pogg. Ann. XXIX. 187—189.
[5] Gehler's Wörterbuch. 2. Auflage. VII. 482.
[6] *Cosmos.* VIII. 174; Polyt. Centralblatt 1856. 570; Dingler's polyt. Journ. CXLI. 73.
[7] Pogg. Ann. XXIX. 490.
[8] Dingler's polyt. Journ. C. 20 und CI. 342
[9] *Mechanics Magazine.* XLVI. 291.

man das Fernrohr senkrecht gegen die Trennungslinie des belegten und unbelegten Theils verschiebt, kann man mehr Strahlen von dem einen oder anderen bekommen, und so die Bilder zweier Sterne, oder die beiden Bilder eines Sterns nach Belieben gleich oder ungleich machen, und ihre Lichtstärke vergleichen. Das Verfahren von Humboldt hat den Vortheil, dass die beiden Sterne, welche verglichen werden sollen, dicht neben einander im Gesichtsfelde desselben Fernrohrs erscheinen. Die Vergleichung so intensiver kleiner Lichtpunkte ist aber schwerer, als die Vergleichung heller Flächen. Diesem Mangel wird durch das Objectiv-Photometer von Steinheil [1] abgeholfen. Es ist dies ein Teleskop, dessen Objectivglas halbirt ist. Vor jeder Hälfte des Objectivs befindet sich ein rechtwinkliges Glasprisma als Spiegel. Das Ganze wird so gestellt, dass die eine Hälfte des Objectivs dem Beobachter den einen, die andere den anderen der zu vergleichenden Sterne zeigt. Dann werden die beiden Hälften des Objectivs einzeln hinausgeschoben, so dass nicht mehr deutliche Bilder, sondern Zerstreuungsbilder der beiden Sterne entstehen, welche desto lichtschwächer werden, je grösser man sie macht, d. h. je weiter man die entsprechende Hälfte des Objectivs hinausschiebt. Jede solche Hälfte ist mit einem rechteckigen Diaphragma versehen, welches mit anderen von anderer Grösse vertauscht werden kann. Die beiden Bilder der Sterne erscheinen nach richtiger Einstellung als zwei dicht an einander grenzende nahe gleich grosse Rechtecke von gleicher Helligkeit, also unter den günstigsten Bedingungen, um kleine Unterschiede der Helligkeit zu erkennen. Durch dieses Instrument sind zuerst genaue Lichtmessungen an Fixsternen und Planeten möglich geworden. Schwerd [2] dagegen benutzte die Diffraction, welche durch enge kreisförmige Diaphragmen entsteht, um helle Flächen hervorzubringen.

Für die physikalischen Untersuchungen dagegen, wobei es sich darum handelt zu bestimmen, wie viel Licht bei Refractionen, Reflexionen und anderen Vorgängen verloren gegangen ist, hat man mit Vortheil das stärkere Licht durch Brechung und Zurückwerfung an unbelegten Glastafeln geschwächt. Brewster [3] und Quetelet [4] brauchten mehrfache nahe senkrechte Reflexionen, um starkes Licht mit schwachem vergleichbar zu machen; 28 bis 29 solche Reflexionen verlöschen z. B. das Sonnenlicht. Duwe [5] benutzte ebenso die Reflexionen an schwarzen Glastafeln, wie sie zu Polarisationsapparaten gebraucht werden. Die verschieden starke Reflexion bei wechselndem Einfallswinkel benutzte Potter [6]. Lichtquelle ist ihm ein halbcylindrisch geformter weisser Schirm, dessen gleichmässige Beleuchtung man voraussetzen muss, die aber schwer zu erreichen sein wird. Die geschickteste Ausführung hat dies Princip in dem Photometer von Arago erhalten, und ist dadurch zur Ausführung sehr genauer Messungen der Lichtstärke brauchbar geworden [7]. Die Lichtquelle dieses Photometers ist ein transparenter, ebener, senkrecht stehender Papierschirm, der am Fenster steht, und in allen seinen Theilen gleichmässig erleuchtet sein muss, was sich übrigens durch das Instrument selbst controlliren lässt. Senkrecht gegen den Schirm und gegen den Horizont ist ferner aufgestellt eine planparallele Glasplatte, unter deren Mitte sich ein Zapfen befindet, um welchen als Axe ein Rohr in einer horizontalen Ebene drehbar ist. Das Rohr ist horizontal gegen die Mitte der Platte gerichtet, und der Beobachter, welcher durch das Rohr sieht, erblickt theils durch die Platte einen Theil des Papierschirms, theils in ihr gespiegelt einen anderen Theil dieses Schirms. Rechts und links von der Glasplatte zwischen ihr und dem Schirm sind horizontal und in etwas verschiedener Höhe schwarze Stäbe angebracht, die dicht neben einander theils durch die Platte, theils von ihr gespiegelt gesehen werden. Wo der gespiegelte schwarze Stab erscheint, sieht der Beobachter das durchgelassene Licht des weissen Schirms allein; wo der schwarze Stab im durchgelassenen Licht erscheint, sieht der Beobachter das gespiegelte Licht

---

[1] Pogg. Ann. XXXIV. 646. — Denkschriften der Münchner Akad. Math.-phys. Klasse. Bd. II. 1836. — Aehnlich die Methode von Johnson. *Cosmos.* III. 301—305.

[2] Bericht über die Naturforscherversammlung 1858.

[3] *Edinburgh Transactions.* 1815.

[4] *Bibl. univ. de Genève.* LII. 212. Pogg. Ann. XXIX. 187—189.

[5] Pogg. Ann. XXIX. 190 Anm.

[6] *Edinburgh Journal of Science.* New Ser. IV. 50 und 320. — Pogg. Ann. XXIX. 487.

[7] *Oeuvres de* Fr. Arago X. p. 184—221.

des weissen Schirms. Die Röhre wird nun so gestellt, dass die beiden schwarzen Streifen gleich hell erscheinen, und der Winkel, unter dem die Röhre gegen die Glasplatte gerichtet ist, wird durch eine passend angebrachte Theilung gemessen. Man kann nun das einfallende oder das gespiegelte Licht allerlei anderen Einwirkungen unterwerfen, und wird dann im Allgemeinen einen anderen Winkel erhalten, unter dem gesehen die beiden Bilder gleich hell erscheinen. Um aus diesem Winkel die stattfindende Schwächung des Lichts berechnen zu können, muss vorher empirisch bestimmt sein, wie sich bei den verschiedenen Einfallswinkeln die durchgelassenen zu den gespiegelten Lichtmengen verhalten, wofür Arago ein besonderes Verfahren vorgeschlagen hat, welches darauf beruht, dass die beiden Strahlenbündel, welche ein doppeltbrechender Krystall giebt, gleich stark und jeder einzelne halb so stark sind, als der ungetrennte Strahl. Indem er so eines der beiden Strahlenbündel durch Doppelbrechung halbirt oder viertheilt, kann er die Stellungen ermitteln, wo das durchgelassene Licht das Viertel, die Hälfte, das Doppelte, das Vierfache des zurückgeworfenen ist und schliesslich durch Interpolation die betreffenden Verhältnisse auch für alle zwischenliegenden Winkel bestimmen.

Arago hatte noch ein anderes Princip zur Schwächung des Lichts vorgeschlagen, nämlich die Polarisation in doppeltbrechenden Krystallen zu benutzen. Lässt man vollständig polarisirtes Licht von der Intensität I in einen solchen Krystall eintreten, und bildet die Polarisationsebene des Lichts mit dem entsprechenden Hauptschnitte des Krystalls einen Winkel φ, so erhält man durch die doppelte Brechung zwei Bündel, deren Intensität beziehlich $I \cos^2\varphi$ und $I \sin^2\varphi$ ist. Kann man den Winkel φ messen, so ist dadurch also auch unmittelbar das Verhältniss der Lichtstärke der gebrochenen Bündel gegeben. Die Nicol'schen Prismen eliminiren das eine Bündel ganz und lassen nur das andere bestehen. Hierauf beruht das Photometer von F. Bernard [1]. Die beiden zu vergleichenden Strahlen werden parallel zu einander, jeder durch zwei drehbare Nicol'sche Prismen geleitet, und dann durch totale Reflexion in einem rechtwinkeligen Glasprisma parallel und dicht neben einander in das Auge des Beobachters gelenkt, der ihre Intensität gleich zu machen sucht dadurch, dass er die Hauptschnitte der beiden Nicol'schen Prismen, durch welche der stärkere Strahl geht, unter einem passenden Winkel gegen einander stellt. Stammt das zu vergleichende Licht aus derselben Lichtquelle her, so kann man die beiden ersten Nicol'schen Prismen weglassen, und an ihrer Stelle ein doppeltbrechendes Prisma gebrauchen, welches das Licht der Quelle in zwei gleiche verschieden polarisirte Hälften spaltet. Sehr ähnlich im Princip ist das Photometer von Beer [2]. Die beiden Strahlenbündel kommen horizontal von rechts und links zum Instrumente, gehen jeder durch ein Nicol'sches Prisma, werden durch einen stählernen Doppelspiegel, der zwei unter 45° gegen den Horizont geneigte spiegelnde Flächen hat, vertical gemacht, und fallen durch einen dritten Nicol in das Auge des Beobachters. Dieser sieht vor sich ein kreisförmiges Feld, dessen rechte und linke Hälfte den beiden reflectirenden Flächen des Doppelspiegels entsprechen, und kann durch Drehung der Nicols die beiden Felder gleich hell machen. Aehnlich ist auch das Photometer von Zöllner [3].

Babinet [4] hat zur Vergleichung der Lichtstärke zweier Strahlenbündel polarisirten Lichts ein Mittel benutzt, welches die Vergleichung ihrer Stärke ungemein erleichtert. Sein Photometer ist zunächst bestimmt, die Helligkeit von Gasflammen zu vergleichen. Eine Röhre läuft in zwei Schenkel aus, von denen der eine die Verlängerung der Röhre bildet, während der andere mit dieser einen Winkel von 70° einschliesst. Beide sind durch mattgeschliffene Glastafeln geschlossen. Am Scheitel des Winkels wird die Röhre von einem Satz Glasplatten durchsetzt, welcher den Winkel halbirt. Werden nun vor die beiden Röhrenenden Lichtquellen gesetzt, so tritt das Licht der einen Quelle in das gemeinsame Röhrenstück, nachdem es von dem Glassatz durchgelassen und senkrecht gegen die Einfallsebene polarisirt ist, und das Licht der anderen Quelle, nachdem es reflectirt, und in der Einfallsebene polarisirt ist. Das ge-

[1] *Annales de Chemie.* (3) XXXV. 385–438. *Cosmos.* II. 496–497 und 635–639. C. R. XXXVI. 728–731.
[2] Pogg. Ann. LXXXVI. 78–88.
[3] Photometrische Untersuchungen. Dissertat. Basel 1859.
[4] C. R. XXXVII. 774.

meinsame Röhrenstück ist durch ein Soleil'sches Polariskop geschlossen. So lange die beiden senkrecht gegen einander polarisirten Lichtmengen ungleiche Intensität haben, sieht man vier complementär gefärbte Halbkreise. Die Farben verschwinden, wenn man beide Lichtmengen dadurch gleich macht, dass man die Entfernung der Flammen verändert. In diesem Instrumente ist also die Vergleichung der Lichtstärke für das Auge zurückgeführt auf die Vergleichung der Farben benachbarter Flächen.

Im Princip ähnlich ist das auf einer Idee von Neumann beruhende Photometer von Wild [1], aber durch die Abänderung des physiologischen Theils des Apparats scheint in diesem Instrumente der höchste Grad von Empfindlichkeit erreicht zu sein. Die beiden zu vergleichenden Strahlen fallen parallel mit einander auf das Instrument und werden schliesslich zur Deckung gebracht, indem der eine unter dem Polarisationswinkel erst von einer Glasplatte *A* und dann von einem ihr parallelen Satze von Glasplatten *B* reflectirt und vollständig polarisirt wird, während der andere Strahl durch den Glassatz *B* hindurchgeht. Ehe dieser zweite Strahl jedoch unter dem Polarisationswinkel auf den Glassatz *B* trifft, ist er schon durch einen eben solchen Glassatz *C* hindurchgegangen. Der Glassatz *C* ist um eine Axe drehbar, so dass der Strahl ihn unter verschiedenen genau messbaren Winkeln passiren kann, wodurch die Menge des durchgelassenen Lichts und das Verhältniss seiner Polarisation geändert wird. Uebrigens ist der Glassatz *C* so gestellt, dass die Polarisation, die der Strahl in ihm erhält, entgegengesetzt ist derjenigen, welche ihm der Glassatz *B* mittheilen würde. Lassen wir den zweiten Strahl senkrecht durch *C* gehen, so fällt er unpolarisirt auf *B*, und wird hier entgegengesetzt dem ersten reflectirten Strahle polarisirt, mit dem er übrigens von da ab auf demselben Wege vereinigt weiter geht. Wird *C* mehr und mehr geneigt, so nimmt die Menge polarisirten Lichts im zweiten Strahle mehr und mehr ab, und zwar in einem Verhältnisse, welches man nach Messung des Einfallswinkels berechnen kann. Mit dem vollständig polarisirten ersten Strahle wird also eine variable Menge theils entgegengesetzt polarisirten, theils natürlichen Lichts des zweiten Strahls gemischt. Dieses gemischte Licht geht nun schliesslich durch eine senkrecht zur Axe geschnittene Kalkspathplatte und einen Turmalin. Ist die Menge polarisirten Lichts in beiden Strahlen gleich gross, so sieht der Beobachter nichts von dem Kreuz mit Ringen in der Kalkspathplatte, wohl aber wird dieses Kreuz sichtbar, sobald die Mengen polarisirten Lichts in beiden Strahlen nicht gleich gross sind. Die Empfindlichkeit des Auges im Erkennen der Polarisationsfigur des Krystalls zeigte sich ausserordentlich gross, so dass bei wiederholten Einstellungen das Verhältniss der Intensitäten sich nur um $1/_{200}$ verschieden fand. Eine noch grössere Genauigkeit hat Wild [2] in seinem neueren Photometer erreicht, wo er statt der polarisirten Glasplatten doppeltbrechende Krystalle und als Polariskop zwei gekreuzte Bergkrystallplatten benutzte, welche unter 45° gegen die Axe geschnitten sind. Durch Linsen sind die Strahlen, die hindurchgehen, parallel gemacht. Dergleichen Platten zeigen ein geradliniges Fransensystem, von dem bei passender Einstellung des Apparats nur ein Querstreifen ausgelöscht wird, während zu beiden Seiten die Farben complementär sind. Der Beobachter kann sehr genau auf die Mitte der ausgelöschten Fransen das Fadenkreuz einstellen. Nach Wild's Angaben beträgt der Fehler bei einmaliger Einstellung nur zwischen 0,001 und 0,002 der Lichtstärke.

Talbot [3] hat zur Schwächung des Lichts eine rotirende Scheibe mit schwarzen und durchsichtigen Sectoren angewendet, und dieses Mittel ist auch von Babinet und Secchi [4] zu Messungen der Sternhelligkeiten angewendet worden.

Von Pouillet [5] ist zur Erleichterung des physiologischen Theils der photometrischen Methoden vorgeschlagen worden, Lichtbilder zu gebrauchen, die nach Daguerre's Verfahren

---

[1] Pogg. Ann. XCIX. 235.
[2] Mitth. der bernischen naturf. Ges. 1859. No. 427—429.
[3] Pogg. Ann. XXXV. 457, 464. *Phil. Magaz.* Nov. 1834. p. 327. Darüber Plateau in *Bullet. de l'Acad. de Bruxelles.* 1835. p. 52.
[4] *Arch. d. sc. phys de Genève.* XX. 121—122. *Memorie dell' osservatorio di Roma. Cosmos.* I. 43.
[5] C. R. XXXV. 373—379. Pogg. Ann. LXXXVII. 490—498. *Inst.* 1852. p. 301. *Cosmos.* I. 546—549.

auf polirten Silberplatten ausgeführt sind. Um ein solches Bild positiv zu sehen, muss es von der Seite beleuchtet sein, der Beobachter aber muss so stehen, dass er irgend einen dunklen Körper, aber nicht das einfallende Licht von der Platte gespiegelt erblickt. Erblickt er im Gegentheil einen sehr hellen Körper von der Platte gespiegelt, so erscheint das Bild negativ, was hell sein sollte, dunkel, und umgekehrt. Dazwischen aber giebt es eine gewisse Helligkeit der gespiegelten Fläche, bei welcher das Bild ganz verschwindet, während es bei der geringsten Vermehrung oder Verminderung der Helligkeit positiv oder negativ auftaucht.

Ein von den bisherigen ganz abweichendes physiologisches Princip der Photometrie hat Schafhäutl [1] benutzt, für dessen Richtigkeit er aber bisher den Beweis noch schuldig geblieben ist. Er behauptet, das Zeitintervall, welches zwischen zwei gleichartigen Lichteindrücken verfliessen kann, ohne dass das Auge die Unterbrechung bemerkt, sei proportional der Wurzel aus der Intensität des Lichts. Sein Apparat besteht aus einer Stahlfeder, die an ihrem unteren Ende so eingeklemmt ist, dass sie in ihrer Gleichgewichtslage vertical steht. An ihrem oberen Ende trägt sie einen rechtwinkligen Schirm von dünnem geschwärzten Kupferblech, der in der Mitte von einer rechteckigen Oeffnung durchbrochen ist. Durch eine horizontale von zwei Dioptern geschlossene Röhre sieht der Beobachter auf den Schirm, welchen die Feder trägt; dahinter ist die Lichtquelle so aufgestellt, dass ihr Licht nur dann in das Auge des Beobachters dringen kann, wenn der Schlitz des Schirms in der Axe der Diopterröhre sich befindet. Die Feder wird so lange verkürzt, bis das Bild der Lichtquelle nicht mehr zitternd, sondern ruhig erscheint. Die Lichtintensitäten sollen den Quadraten der Schwingungszeiten (umgekehrt?) proportional sein, oder den vierten Potenzen der Federlängen. Selbst wenn wir die erstere Proportionalität zugeben wollten, würde die letztere bei einer schwingenden belasteten Feder nicht zutreffen.

Endlich ist hier noch die Methode zu erwähnen, welche Fraunhofer [2] gebraucht hat, um die Lichtstärke der verschiedenen Farben des Spectrum von Glasprismen unter einander zu vergleichen. Das Spectrum wurde wie gewöhnlich durch ein Fernrohr beobachtet, vor dessen Objectiv A (*Fig. 136*) ein Prisma P gesetzt ist. B ist die Ocularlinse. Innerhalb der Ocularröhre ist, 45° gegen die Axe des Fernrohrs geneigt, ein kleiner Stahlspiegel s befestigt, dessen eine scharfe Kante in der Brennebene des Oculars liegt und die Fernrohraxe schneidet. In der vom Spiegel nicht bedeckten Hälfte der Ocularblendung erscheint ein Theil des prismatischen Spectrum. Der Spiegel dagegen reflectirt das Licht einer kleinen Oelflamme L, welche in einem seitlich der Ocularröhre angesetzten, oben und unten aufgeschlitzten Rohre verschiebbar ist. Vor dieser Flamme ist eine kleine Blendung b angebracht, durch die die sichtbare leuchtende Fläche begrenzt ist. Dem Beobachter erscheint dieses Licht nur in einem breiten Zerstreuungskreise, dessen Helligkeit dem Quadrate der Entfernung sb umgekehrt proportional ist. Man verschiebt nun die Lampe so lange, bis die Helligkeit der beiden in der Ocularblendung erscheinenden Halbkreise gleich ist, d. h. bis die Grenze beider am undeutlichsten erscheint. Die Versuche von Fraunhofer haben sehr wenig übereinstimmende Zahlen gegeben für die Helligkeit der verschiedenen Theile des Spectrum,

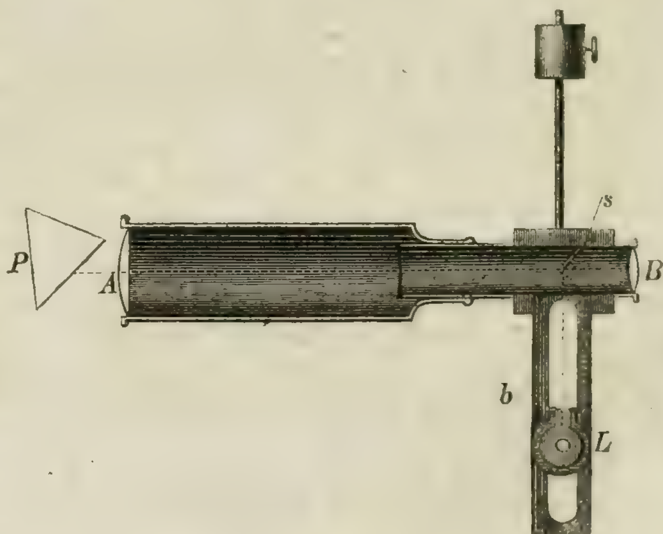


Fig. 136.

[1] Abbildung und Beschreibung des Universal-Vibrations-Photometer. Münchner Abhandl. VII. 465–497.
[2] Gilbert's Ann. 1817. Bd. 56. S. 297

wahrscheinlich hauptsächlich deshalb, weil ihm der Einfluss der absoluten Intensität auf die relative Helligkeit der Farben unbekannt war.

Die ersten Messungen über die Empfindlichkeit des Auges für Lichtunterschiede hat Bouguer ausgeführt, und dabei gefunden, dass die wahrnehmbare Differenz ein nahehin constanter Bruchtheil der ganzen Intensität sei. Dasselbe Gesetz wurde später von Steinheil, Masson, Arago, Volkmann bei photometrischen Messungen wiedergefunden, und von Fechner ausführlich behandelt.

Die Beobachtungen über die verschiedene relative Helligkeit der Farben sind zum Theil von Purkinje, später vollständiger von Dove, an Spectralfarben von Helmholtz ausgeführt.

Unter den Gegenständen dieses Paragraphen sind über die Irradiation die meisten Untersuchungen und Streitigkeiten geführt worden. Die Thatsache, dass helle Gegenstände unter Umständen vergrössert erscheinen, drängte sich natürlich schon früh der Beobachtung auf. Plateau citirt Epikur's Brief an Pythokles, in dem erwähnt wird, dass eine Flamme bei Tage in der Ferne kleiner aussehe als bei Nacht, und dass deshalb auch wohl die Sterne zu gross erscheinen könnten; dann den Anfang der dritten Satire des Persius. — *Jam clarum mane fenestras Intrat et angustas extendit lumine rimas.*

Später waren es besonders die Astronomen, welche die Erscheinungen der Irradiation untersuchten, weil sie sich bei ihren Beobachtungen über die Grösse der Himmelskörper störend bemerklich machte. Keppler [1] schob sie hauptsächlich auf mangelnde Accommodation und hat damit allerdings das Wesentliche der meisten dazu gehörigen Erscheinungen getroffen. Ebenso studirte sie Galilei [2] genauer; er spricht es aus, dass sie desto lebhafter ist, je grösser der Unterschied des hellen Objects und des dunklen Grundes, dass helle Objecte stets vergrössert werden, dagegen dunkle Objecte auf hellem Grunde (Merkur und Venus vor der Sonne) verkleinert werden, dass die Vergrösserung sehr kleiner Objecte am bedeutendsten ist. Anfangs glaubte er, wie Gassendi [3], annehmen zu dürfen, dass leuchtende Gegenstände die umgebende Luft entzündeten, später aber suchte er den Grund richtiger in unregelmässigen Brechungen im Auge. Auch Gassendi glaubte später, dass die Sterne bei Nacht grösser erschienen, weil die Pupille weiter sei. Für sein Auge schwankte der Durchmesser des Mondes, je nach der Helligkeit des Grundes, zwischen 33′ und 38′. Die Verkleinerung kleiner Gegenstände auf hellem Grunde erörterte namentlich Schickard [4], der zugleich die Behauptung aufstellte, dass das Licht am Rande dunkler Objecte sich zum Theil in den Schattenraum hinein ausbreite, wie denn auch später le Gentil [5] die Irradiation durch Diffraction zu erklären suchte. Dagegen suchte Horrockes [6] in Galilei's Sinne zu vertheidigen, dass die Irradiation ihren Sitz im Auge habe. Descartes meinte, dass beim Anblick heller Gegenstände die Pupille sich verengere, das Auge einem nahe sehenden ähnlich werde, und dadurch die Beurtheilung der Entfernung und Grösse solcher Objecte verändert werde, ausserdem aber könne die Bewegung der Netzhautelemente, wenn sie sehr heftig werde, auf die benachbarten übertragen werden, so dass das empfundene Bild grösser erscheine. Hierdurch ist Descartes der Urheber der auf Uebertragung der Nervenerregung gegründeten Theorie der Irradiation geworden. Als nun später die Astronomen stark vergrössernde und gut gearbeitete Fernröhre zu gebrauchen anfingen, machte sich die Irradiation bei den grösseren Gestirnen kaum noch merklich, und man fing an sie zu bezweifeln und zu läugnen [7], während andere Astronomen ihre Existenz anerkannten [8]. Bei den astronomischen Beobachtungen vermischen sich in der Regel die Wirkungen der chromatischen und sphärischen Aberration des Fernrohrs mit denen der Unvollkommenheiten des Auges, und es musste hier nothwendig das Urtheil der Astronomen, welche Fernröhre gebrauchten, verschieden ausfallen, je nach der Beschaffenheit des Fernrohrs. Dass bei den besten Fernröhren die Irradiation sich in den Messungen nicht mehr merklich macht, hat namentlich Bessel 1832 beim Durchgang des Merkur vor der Sonne gezeigt.

Während die Astronomen meistens nur die Frage verhandelten, ob Irradiation bestehe oder nicht, die Frage über ihre Ursachen dagegen übergingen, fingen andere Naturforscher

---

1 Paralipomena. p. 217, 220; 285.

2 *Opere di Galilei.* T. II. p. 18; 255—257, 396; 467—469. Systema cosmicum. Lyon 1641. Dial. III. p. 248.

3 Opera omnia. Florenz 1727. T. III. p. 385, 567, 583—585. T. I. p. 499—508.

4 Pars responsi ad epistolas P. Gassendi de Mercurio sub sole viso. Tubingae 1632.

5 *Mém. de l'Acad. d. Sc. de Paris.* 1784. p. 469. (Gelesen 1743.)

6 Venus in sole visa. Cap. XVI. Abgedruckt hinter Hevelius' Mercurius in sole visus.

7 Biot. *Traité élémentaire d'astronomie physique edit.* 2me. p. 534, 536. — Delambre. *Astronomie théorique et pratique.* T. II. chap. 26. §. 197. T. III. chap. 29. §. 12. — Bessel Astronom. Nachrichten 1832. No. 228.

8 Hassenfratz. *Cours de physique céleste.* 1810. p. 23. — J. Herschel. *On light.* T. I. §. 697. — Quetelet *Positions de Physique.* 1829. T. III. p. 81. — Brandes in Gehler's physikal. Wörterbuch. Neu bearbeitet. V. 796. Robison. *Mém. of the Roy. Astron. Soc. of London.* V. p. 1.

auch an, letztere Frage zu behandeln. J. Müller [1] betrachtete anfangs die Irradiation, wie wir es oben gethan haben, als eine Ausbreitung objectiven Lichts, später wurde er selbst, so wie die meisten anderen Physiologen jener Zeit, in welcher sich auch die Lehre von den Mitempfindungen entwickelte, durch die sehr ausführliche Arbeit von Plateau [2] über die Irradiation bewogen, sie von einer Uebertragung der Reizung von einem Netzhautelement auf das andere abzuleiten. Die Erscheinungen, welche Plateau als Irradiation beschreibt, sind von der Art, wie sie ein schwach kurzsichtiges Auge an entfernteren Gegenständen sehen muss, es sind also meist Erscheinungen unvollkommener Accommodation. Diese Deutung weist er aber zurück, weil er auch die geringe Irradiation, welche sehr helle Gegenstände in der Entfernung des deutlichen Sehens zeigen, beobachtet hatte, und die übrigen Ursachen der Lichtzerstreuung im Auge, welche in diesem Falle wirksam werden, noch nicht kannte. Er stützt sich ferner darauf, dass nach seinen Versuchen die Irradiation bei verschieden entfernten Objecten immer dieselbe Winkelgrösse behalte; doch beziehen sich seine Messungen nur auf Entfernungen von mehr als 0,6 Meter, also auf Distanzen, innerhalb deren sich der Accommodationsfehler nicht mehr merklich änderte. Auffallend ist, dass ihn seine Versuche mit Linsen, die die richtige Sehweite herstellten, und damit die Irradiation aufhoben, nicht auf die richtige Erklärung geleitet haben. Ebenso möchte es schwer sein, seinen Satz, dass zwei benachbarte Irradiationen sich gegenseitig schwächen, mit irgend einer Voraussetzung, wie Mitempfindungen erregt werden mögen, zu vereinigen. Denn wenn die Netzhauttheile, welche im Bilde des schwarzen Streifens liegen, von beiden Seiten her in Erregung versetzt werden, muss ihre Erregung nothwendig stärker werden, als wenn nur an einer Seite ein helles Feld anstösst. Plateau muss die genannte Behauptung aufstellen, um zu erklären, dass ein feiner schwarzer Strich auf einem hellen Felde überhaupt noch gesehen wird, wenn der Strich schmaler ist als die Breite der Irradiationssäume; während sich alles einfach erklärt, wenn man annimmt, die Irradiation rühre von Zerstreuungsbildern her.

Eine Kritik der Arbeit von Plateau hat Fechner und später ausführlicher H. Welcker [3] gegeben und die Erklärung von Keppler wiederhergestellt, welche in der That bei weitem die meisten Fälle der Irradiation umfasst. Hinzuzusetzen wäre der Welcker'schen Arbeit eben nur noch, dass sehr kleine und sehr helle Gegenstände auch in der Entfernung des deutlichsten Sehens Irradiation zeigen, wegen der übrigen Arten der Abweichung der Strahlen im Auge. An Welcker schlossen sich andere an, welche die verschiedenen Arten der Lichtzerstreuung im Auge für die Erklärung der Irradiation gebrauchten, namentlich lenkten Fliedner [4] und H. Meyer [5] (Leipzig), Cramer die Aufmerksamkeit auf die monochromatischen Abweichungen des Auges, Fick auf die chromatische. Es fehlte aber den bisher gegebenen objectiven Erklärungen der Irradiation immer noch der Grund, warum nur die Erhöhung der Helligkeit auf dem dunklen Grunde, und nicht zugleich die Schwächung am Rande der hellen Fläche wahrgenommen wird. Diesen meint der Verfasser in der obigen Darstellung nachgewiesen zu haben.

Messung der Empfindlichkeit.

1760. Bouguer. *Traité d'Optique sur la gradation de la lumière, publ. par Lacaille.* Paris 81.
1837. Steinheil. Abhandl. der math.-phys. Klasse der bayr. Akademie 1837. S. 14.
1845. Masson. *Ann. de chim. et de phys.* XIV. 150.
1858. Arago. *Oeuvres complètes.* X. 255.
*G. Th. Fechner. Ueber ein wichtiges psychophysisches Gesetz. Leipzig. Aus den Abhandl. der sächs. Gesellschaft der Wissensch. Math.-phys. Klasse. IV. 457. — Nachtrag dazu im Berichte der sächsischen Gesellschaft 1859. S. 58.

Vergleichung der Helligkeit verschiedener Farben.

1814. J. Fraunhofer in Denkschr. der bayr. Akad. V. 211.
1825. Purkinje. Zur Physiologie der Sinne. II. 109.
1852. *Dove. Ueber den Einfluss der Helligkeit einer weissen Beleuchtung auf die relative Intensität verschiedener Farben. Berl. Monatsber. 1852. S. 69—78. Pogg. Ann.

---

[1] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes. 1826. S. 400.
[2] *Mém. de l'Acad. de Bruxelles.* T. XI. Pogg. Ann. Ergänzungsband. I. S. 79, 193, 405.
[3] Ueber Irradiation und einige andere Erscheinungen des Sehens. Giessen 1852.
[4] Pogg. Ann. LXXXV. 348.
[5] Pogg. Ann. LXXXIX. 540.

LXXXV. 397—408. *Inst.* 1852. p. 193. *Phil. Magaz.* (4) IV. 246—249. *Arch. d. sc. phys.* XXI. 215—219. *Cosmos.* I. 208—211.
POUILLET. C. R. XXXV. 373—379. Pogg. Ann. LXXXVII. 490—498. *Inst.* 1852. p. 301. *Cosmos.* I. 546—549.
1855. H. HELMHOLTZ. In Pogg. Ann. XCIV. 18—21.

Irradiation.

1604. KEPPLER ad Vitellionem Paralipomena. Frankfurt 1604. p. 217.
1619. GALILEI. *Discorso delle comete di Mario Guiducci.* Opere II. 256, ferner Op. II. 18, 396, 467—469. Systema cosmicum. Lyon 1641. Dial. III. p. 248.
1632. SCHICKARD. Pars responsi ad epistolas P. GASSENDI de Mercurio sub sole viso. Tubingae 1632. (Der Planet wird durch Irradiation verkleinert.)
1637. DESCARTES. *Dioptrique.* Leyde 1637. *Discours.* VI. p. 67 und 68.
1642. GASSENDI. Epistola III de proportione, qua gravia decidentia accelerantur. Opera omnia. III. 585.
1738. JURIN. *On distinct and indistinct vision.* §. 53, in SMITH's *Optics.*
1743. LE GENTIL. *Mém. de l'Acad. des sc. de Paris.* 1784. p. 469.
1810. HASSENFRATZ. *Cours de physique céleste.* 1810. p. 23.
1811. BIOT. *Traité élémentaire d'astronomie physique.* édit. 2[me]. p. 534, 536.
1814. DELAMBRE. *Astronomie théorique et pratique.* T. II. Chap. 26. §. 197. T. III. Chap. 29. §. 12.
1826. J. MÜLLER. Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. S. 400.
1828. BRANDES in GEHLER's neuem physik. Wörterbuch. V. 796.
J. HERSCHEL. *On light.* I. §. 697.
1829. QUETELET. *Positions de physique.* III. 81.
1832. BESSEL in Astronom. Nachrichten 1832. No. 228.
1838. * PLATEAU. *Mémoire sur l'irradiation Nouv. Mém. de l'Acad. de Bruxelles.* T. XI. Pogg. Ann. Ergänzungsbd. I. S. 79, 193, 405.
1840. FECHNER. Von der sogenannten Irradiation. Pogg. Ann. L. 195.
1849. BADEN POWELL *sur l'irradiation. Inst.* 1849. No. 818. p. 288. *Memoirs of the London astron. Society.* XVIII. p. 69. *Inst.* No. 840. p. 47. *Report of British Assoc.* 1849. 2. p. 21.
1850. HAIDINGER. Das Interferenzschachbrettmuster. Wiener Ber. VII. 389. Pogg. Ann. LXXXV. 350. *Cosmos.* I. 252, 454. (Fall von Irradiation, vermischt mit monochromatischen Abweichungen.)
1851. DOVE. Ueber die Ursache des Glanzes und der Irradiation. Pogg. Ann. LXXXVIII. 169. Berl. Monatsber. 1851. p. 252. *Phil. Mag.* (4) IV. 241. *Arch. d. sc. phys. et nat.* XXI. 209. *Inst.* No. 991. p. 421.
1852. * H. WELCKER. Ueber Irradiation und einige andere Erscheinungen des Sehens. Giessen 1852.
FLIEDNER. Beobachtungen über Zerstreuungsbilder im Auge, so wie über die Theorie des Sehens. Pogg. Ann. LXXXV. 348.
TROUESSART. *Note concernant ses recherches sur la théorie de la vision.* C. R. XXXV. 134—136. *Arch. d. sc. phys.* XX. 305—306.
L. L. VALLÉE. *Mémoire* XIII. *De la vision considérée dans les influences en quelque sorte moléculaires, exercées dans les réfractions, et du phénomène de l'irradiation.* C. R. XXXV. 679—681.
1853. H. MEYER. Ueber die sphärische Abweichung des menschlichen Auges. Pogg. Ann. LXXXIX. 540—568. FECHNER. Centralblatt 1853. p. 864.
1854. F. BURCKHARDT zur Irradiation. Verh. der naturforsch. Gesellschaft zu Basel. I. 154—157.
1855. A. CRAMER. Beitrag zur Erklärung der sogenannten Irradiationserscheinungen. Prager Vierteljahrschrift 1855. IV. 50—70.
1856. A. FICK. Einige Versuche über die chromatische Aberration des menschlichen Auges. Archiv für Ophthalmol. II. 2. p. 70—76.
1857. A. W. VOLKMANN über Irradiation. Bericht der sächs. Gesellschaft 1857. p. 129.

§. 22. Die Dauer der Lichtempfindung.

Wenn ein Muskelnerv durch einen kurzdauernden elektrischen Schlag erregt wird, so vergeht eine kurze Zeit (etwa $^1/_{60}$ Sec.), ehe die Wirkung der

Reizung durch Contraction des Muskels sichtbar wird, und es vergeht eine viel längere Zeit (etwa $^1/_6$ Sec.), ehe die Wirkung der Reizung auf den Muskel wieder verschwindet. Die Veränderung, welche durch die Reizung in den organischen Theilen eintritt, verläuft also viel langsamer, als die elektrische Entladung, welche die Reizung bewirkte. Dasselbe findet im Auge statt. Wir können allerdings bis jetzt noch nicht nachweisen, dass die Empfindung später entsteht, als das Licht einzuwirken anfängt, aber wohl, dass sie noch andauert, wenn das Licht schon aufgehört hat einzuwirken.

Die Dauer der Nachwirkung ist desto grösser, je stärker das einwirkende Licht gewesen ist, und je weniger ermüdet das Auge. Wenn man einen Augenblick nach der Sonne oder in eine helle Lichtflamme geblickt hat, und dann plötzlich die Augen schliesst und mit der Hand bedeckt, oder in einen absolut dunklen Hintergrund blickt, so sieht man noch kurze Zeit auf dem dunklen Grunde eine helle Erscheinung von der Gestalt des vorher gesehenen hellen Körpers, welche allmälig erblasst und dabei auch ihre Farbe verändert. Die Nachbilder sehr heller Objecte sind am leichtesten zu sehen, weil sie am längsten dauern. Uebrigens kann man auch von weniger hellen Objecten solche Nachbilder, wie sie hier beschrieben sind, erhalten, wenn nur das Auge vorher im Dunkeln gehörig ausgeruht ist, und man dann für einen Augenblick das Object betrachtet. Ein solches Nachbild eines hellen Körpers auf dunklem Grunde hat im ersten Augenblicke die Farbe des Objects, und zeigt oft sehr genau noch die einzelnen Theile des Objects in richtiger Gestalt und Schattirung. Dreht man z. B. in einem übrigens unbeleuchteten Zimmer eine Lampe aus, indem man im letzten Augenblicke noch nach der Flamme hinblickt, so sieht man nachher noch im Dunkeln das helle Bild der Flamme umgeben von dem etwas schwächeren der Glocke u. s. w. Aendert man die Richtung des Auges, so bewegt sich das Nachbild in gleichem Sinne, sodass es immer diejenige Stelle des Gesichtsfeldes einnimmt, welche der ursprünglich vom Lichte getroffenen Stelle der Netzhaut entspricht. Damit das Nachbild recht scharf gezeichnet sei, ist es nöthig, vom Object einen einzigen Punkt scharf zu fixiren. Wenn das Auge gewankt hat, ist das Nachbild verwaschen, oder man sieht auch wohl zwei oder drei Bilder des Objects sich theilweise deckend. Ist das Bild recht scharf gezeichnet, so kann man unter günstigen Umständen an diesem Nachbilde Einzelheiten bemerken, auf die man während der Betrachtung des Objectes selbst die Aufmerksamkeit nicht gewendet, und die man deshalb übersehen hatte.

Dergleichen Nachbilder heller Objecte, in denen die hellen Theile des Objects hell, die dunkeln dunkel erscheinen, und die deshalb positive Nachbilder genannt werden, vermischen sich übrigens gewöhnlich, während sie allmälig verschwinden, mit anderen Bildern, in denen das Helle des Objects dunkel, das Dunkle hell erscheint, mit negativen Nachbildern, welche hauptsächlich dadurch hervorgerufen zu sein scheinen, dass die Empfänglichkeit der Netzhaut für Licht ebenfalls durch die vorausgegangene Lichtwirkung verändert worden ist. Es lassen sich diese beiden Arten von Erscheinungen in der Beschreibung nicht streng von einander trennen. Ich werde deshalb die genauere Schilderung der positiven Nachbilder erst im nächsten Paragraphen mit der der negativen zu-

sammen geben, und in diesem Paragraphen mich darauf beschränken die Wirkungen schnell wiederholter Lichteindrücke zu beschreiben, bei denen die Nachdauer des Lichteindrucks rein zur Erscheinung kommt, ohne wesentlich durch die veränderte Reizempfindlichkeit des Auges gestört zu werden.

Die Hauptthatsache dieses Gebietes ist die, dass hinreichend schnell wiederholte Lichteindrücke ähnlicher Art dieselbe Wirkung auf das Auge ausüben wie eine continuirliche Beleuchtung. Die Wiederholung des Eindrucks muss zu dem Ende nur so schnell geschehen, dass die Nachwirkung eines jeden Eindrucks noch nicht merklich nachgelassen hat, wenn der nächste eintritt.

Am leichtesten zeigen dies die rotirenden Scheiben. Wenn sich auf einer schwarzen Scheibe ein heller weisser Punkt befindet, und die Scheibe rotirt schnell genug, so erscheint an Stelle des rotirenden Punktes ein grauer Kreis, der in allen seinen Punkten ganz gleichmässig aussieht, und an welchem nichts mehr von Bewegung zu entdecken ist. Indem das Auge nämlich irgend eine Stelle des scheinbar ruhenden Kreises fixirt, werden die Stellen der Netzhaut, auf welchen der Kreis sich abbildet, in schneller Wiederholung von dem Bilde des weissen Punktes getroffen, der sich in dem Kreise bewegt. Sie empfangen also einen Lichteindruck, der wegen der Schnelligkeit der Wiederholung continuirlich erscheint, und natürlich nicht so stark ist, als wenn fortdauernd weisses Licht auf die Netzhaut fiele, daher nicht weiss, sondern grau erscheint. Bewegt sich dagegen das Auge selbst, so dass sein Fixationspunkt sich in derselben Richtung fortbewegt, wie der helle Punkt, so kann letzterer sichtbar und die scheinbare Continuität des grauen Kreises dadurch unterbrochen werden. Es ist leicht ersichtlich, dass wenn der Fixationspunkt des Auges sich eine Zeit lang genau ebenso schnell und in derselben Richtung fortbewegte, wie der helle Punkt und immer auf diesen geheftet bliebe, sich das Bild des hellen Punktes dauernd auf dem gelben Flecke der Netzhaut befinden würde, und auf die übrigen Stellen des Augengrundes nur das Bild der dunklen Scheibe fallen würde. Unter diesen Umständen erkennt das Auge die Anwesenheit eines weissen Flecks an Stelle des grauen Kreises; ebenso wenn die Bewegungen des Fixationspunktes und des hellen Flecks zwar nicht ganz congruent sind, aber die relative Bewegung beider gegen einander verhältnissmässig gering ist [1].

Befindet sich auf der Scheibe noch ein zweiter heller Punkt in derselben Entfernung vom Mittelpunkte wie der erste, so wird auch der zweite scheinbar zu einem hellen Kreise ausgebreitet, welcher mit dem hellen Kreise des ersten Punktes zusammenfällt. Die Eindrücke beider Punkte auf der Retina addiren sich. Ebenso wenn eine grössere Zahl heller Punkte auf demselben Kreise stehen. Wenn man sich daher auf einer solchen rotirenden Scheibe Kreislinien gezogen denkt, deren Mittelpunkt in der Rotationsaxe der Scheibe liegt, so geben bei der Rotation alle Punkte einer solchen Kreislinie einzeln genommen das Bild einer gleichmässig beleuchteten Kreislinie, und alle diese kreisförmigen Bilder

---

[1] Siehe Dove in Pogg. Ann. LXXI. 112. Stevelly in Sillim J. (2.) X. 401. — Montigny. *Bull. de Bruxelles.* XVIII. 2. p. 4. Institut 1847. No. 928. p. 332.

der einzelnen Punkte fallen auf dieselben Theile der Netzhaut und vereinigen sich hier zu einem Gesammtbilde. Für diese Erscheinung kann man nun folgendes Gesetz aufstellen: Jede Kreislinie der Scheibe, deren Mittelpunkt in der Rotationsaxe liegt, erscheint so, als ob alles Licht, welches sämmtliche Punkte der Kreislinie von sich geben, gleichmässig über die ganze Länge der Kreislinie verbreitet sei, und zwar scheint dieses Gesetz ebenso gut für einfarbiges wie für vielfarbiges Licht zu gelten. Beziehen wir dieses Gesetz auf die Thätigkeit der Netzhaut selbst, so können wir es so aussprechen: Wenn eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem und regelmässig in derselben Weise wiederkehrendem Lichte getroffen wird, und die Dauer der Periode hinreichend kurz ist, so entsteht ein continuirlicher Eindruck, der dem gleich ist, welcher entstehen würde, wenn das während einer jeden Periode eintreffende Licht gleichmässig über die ganze Dauer der Periode vertheilt würde.

Um die Richtigkeit dieses Gesetzes zu prüfen, construire man sich solche Scheiben, wie *Fig. 137*. Der innerste Ring zeigt die halbe Peripherie Weiss, die andere Hälfte Schwarz; im mittleren Ringe sind zwei Viertel, d. h. wieder die halbe Peripherie weiss, im äusseren ebenso vier Achtel, der Rest schwarz. Lässt man eine solche Scheibe rotiren, so erscheint sie in ihrer ganzen Ausdehnung ganz gleichmässig grau gefärbt. Nur muss man darauf achten, dass die Scheibe schnell genug rotirt, um auch im innersten Ringe einen vollkommen continuirlichen Eindruck zu geben. Ebenso kann man auch das Weiss über andere beliebig lange Bogenstücke der Peripherie vertheilen; vorausgesetzt nur, dass in allen Ringen der Scheibe die Summe der Winkel, welche das Weiss einnimmt, gleich gross ist, so geben alle immer dasselbe Grau. Statt des Schwarz und Weiss kann man auch verschiedene Farben nehmen, und erhält in allen Ringen dieselbe Mischfarbe, wenn die Summe der Winkel, welche jede der beiden Farben in den verschiedenen Ringen einnimmt, gleich gross ist.



Fig. 137.

Auf diese Weise kann man leicht eine grosse Menge von Prüfungen des Gesetzes ausführen, aber freilich immer nur intermittirendes Licht mit intermittirendem vergleichen, und zwar nur unter Umständen, wo die Qualität der beiden Eindrücke, welche abwechseln, in den verschiedenen verglichenen Fällen dieselbe ist.

Um nun die Richtigkeit des Gesetzes auch für solche Fälle zu verificiren, wo intermittirendes Licht mit continuirlichem verglichen werden soll, habe ich die in *Fig. 137* abgebildete Scheibe angewendet, auf welcher Weiss und Schwarz gleich grosse Winkel einnehmen. Bei der Rotation erscheint ein Grau von der halben Helligkeit des Weiss. Nun kann man andererseits ein solches Grau her-

vorbringen, wenn man auf eine schwarze Tafel einen weissen Streifen legt, und diesen durch ein doppeltbrechendes Prisma ansieht. Dann erscheinen zwei Bilder des Streifen, jedes aber von der halben Helligkeit. Eine grössere graue Fläche dieser Art erhält man, wenn man abwechselnd gleich breite weisse und schwarze Streifen auf der Tafel anbringt, und sich mit dem doppeltbrechenden Prisma in eine solche Entfernung stellt, dass die Doppelbilder der weissen Streifen sich genau mit denen der schwarzen decken; dann erscheint die ganze Fläche grau mit der halben Helligkeit der weissen Streifen. Dieses Grau ist nun genau dasselbe, welches durch Umdrehung der Scheibe *Fig. 137* entsteht. Natürlich muss man bei der Vergleichung zu letzterer dasselbe Schwarz und Weiss nehmen, aus dem man die parallelen Streifen gemacht hat, muss beide Flächen genau gleich beleuchten, und auch die rotirende Scheibe durch das doppeltbrechende Prisma betrachten, aber so, dass sich ihre beiden Bilder nicht trennen, damit auch das Licht der Scheibe der Reflexion und Absorption im Prisma eben unterworfen wird, wie das der weissen Streifen. Plateau erwies dasselbe Gesetz auf folgendem Wege. Er brachte eine rotirende Scheibe mit weissen und schwarzen Sectoren und eine ganz weisse in verschiedene Entfernung von einem Lichte, bis ihre Helligkeit gleich gross erschien. Ist die Zahl der weissen Sectoren n, und die Breite jedes einzelnen in Winkelgraden gleich w, so ist die Breite aller zusammengenommen gleich nw. Hat nun das Weiss in der Entfernung 1 von der Lichtquelle die Helligkeit H, und denken wir das Licht, welches es aussendet, über die ganze Scheibe gleichmässig verbreitet, so wird die Helligkeit geschwächt in dem Verhältnisse, welches die Fläche der ganzen Scheibe zu der der weissen Sectoren hat. Die Helligkeit wird also $\frac{nw}{360}H$.

Wenn nun die rotirende Scheibe in der Entfernung r von der Lichtquelle gleich hell ist mit einer ganz weissen Scheibe in der Entfernung R, so muss sein

$$\frac{nw}{360}\frac{H}{r^2} = \frac{H}{R^2} \text{ oder } \frac{r^2}{R^2} = \frac{nw}{360}.$$

Die Messungen Plateau's stimmen mit diesem Gesetz auch genügend überein.

Ich selbst habe ausserdem auch noch folgenden Weg eingeschlagen. Wenn man eine mit schmalen schwarzen und weissen Sectoren bedeckte Scheibe hat, so kann man eine scheinbar gleichmässige Vertheilung des Lichtes der weissen Sectoren über die ganze Scheibe hervorbringen, indem man zwischen Auge und Scheibe eine convexe Glaslinse bringt, welche die Accommodation verhindert. Steht die Pupille im hinteren Brennpunkte der Linse, so dass das Bild, welches die letztere von der Scheibe entwirft, in die Fläche der Pupille fällt, und grösser ist als die Pupille, so erscheint das Licht der hellen Sectoren gleichmässig über das ganze durch die Linse gesehene Gesichtsfeld ausgegossen. Nähert man dagegen die Linse der Scheibe, so sieht das Auge mehr oder minder scharf die einzelnen weissen und schwarzen Sectoren, so lange die Scheibe stillsteht. Ist die Scheibe in Bewegung, so bleibt die Helligkeit gleich gross, man mag die Linse dem Auge oder der Scheibe näher bringen, woraus

unmittelbar folgt, dass das Auge von dem intermittirenden Licht gleich stark, wie von einer gleichen Quantität continuirlich ankommenden Lichtes afficirt wird.

Für farbiges Licht geht die Richtigkeit des oben hingestellten Satzes aus den Versuchen von DOVE hervor über die Erscheinungen, welche rotirende Polarisationsapparate darbieten. Wenn zwischen zwei NICOL'sche Prismen doppeltbrechende Krystallplatten eingeschaltet sind, so entstehen bekanntlich in vielen Fällen bei gewissen Stellungen der genannten Prismen Farben, die theils gleichmässig über das ganze Feld verbreitet sind, theils farbige Figuren bilden. Bei allen diesen Erscheinungen bekommt aber jeder Punkt der Figur, wie theoretisch in der Lehre von der Polarisation des Lichts nachgewiesen werden kann, genau die Complementärfarbe, wenn man das eine NICOL'sche Prisma um einen rechten Winkel dreht. Der Versuch bestätigt es nun, dass bei schneller Rotation des einen NICOL das Auge Weiss sieht. Schaltet man noch ein farbiges Glas ein, so erhält man bei zwei um 90° verschiedenen Stellungen des einen NICOL Farben, welche vereinigt die Farbe des Glases geben müssen, und bei schneller Rotation auch wirklich geben.

Uebrigens wird unser Gesetz für intermittirendes farbiges Licht auch bestätigt durch die Uebereinstimmung, welche die Resultate der Farbenmischung auf der drehenden Scheibe mit denen haben, die man durch directe Zusammensetzung des farbigen Lichts gewinnt, was in §. 20 bei der Lehre von der Farbenmischung schon erwähnt ist. Will man die ganze Scheibe gleichmässig mit der Mischfarbe überzogen sehen, so pflegt man die Scheibe in Sectoren abzutheilen, und den einzelnen Sectoren verschiedene Färbung zu geben, die aber in der Ausdehnung jedes einzelnen Sectors ganz constant sein muss. Dann erscheint bei der Rotation die ganze Scheibe in der Mischfarbe. Die Lichtstärke der Mischfarbe ist aber dabei nach dem obigen Gesetz immer das Mittel aus der Lichtstärke der einzelnen gemischten Farben, und da alle Farbstoffe bei gleicher Beleuchtung dunkler als weiss erscheinen, indem sie nur gewisse Farben, die einen Theil des gesammten weissen Lichts bilden, reflectiren, so ist auch die Mischfarbe immer lichtschwächer als Weiss, erscheint also, wenn sie wenig gesättigt ist, grau.

Führt man auf einer Farbenscheibe einen farbigen Stern auf andersfarbigem Grunde aus wie *Fig. 138*, so sieht man bei der Rotation der Scheibe in der Mitte die Farbe des Sterns, am Rande die des Grundes, dazwischen alle continuirlichen Uebergangsstufen der einen Farbe durch die Reihe der Mischfarben in die andere. Ueberhaupt kann man auf den rotirenden Scheiben die Helligkeit oder die Farbenmischung von der Mitte nach dem Rande hin nach jedem beliebig gewählten Gesetze sich ändern lassen, indem man die Curven, welche die Sectoren begrenzen, passend wählt, wie wir z. B. schon in *Fig. 134* dies Mittel benutzt haben, um eine bestimmte Vertheilung des Halbschattens darzustellen.



Fig. 138.

Auf den rotirenden Scheiben beschreiben die einzelnen Punkte Kreislinien. Dieselbe Continuität des Eindrucks findet natürlich auch statt, wenn ein heller Punkt sich in irgend einer anderen geschlossenen Curve bewegt. Ueberzieht man z. B. eine gespannte Metallsaite mit schwarzer Farbe, macht einen Punkt der Saite wieder frei von dem dunkeln Ueberzuge, und beleuchtet ihn passend, so erscheint die Bahn dieses Punktes, wenn die Saite in Schwingungen gesetzt wird, als eine continuirliche oft sehr verschlungene Lichtlinie. Beschreibt der Punkt dabei einen Weg, der nicht genau in sich zurückkehrt, aber bei jedem folgenden Umlaufe doch der Bahn des früheren Umlaufs sehr nahe kommt, so erscheint dem Auge eine lichte Linie, die allmälig ihre Gestalt und Lage verändert. Wie man in dem angegebenen Beispiele die Schwingungsform einer Saite kennen lernt, so hat dasselbe Princip in der Physik noch eine grosse Zahl von anderen nützlichen Anwendungen erhalten.

Ist die Helligkeit des bewegten Punktes in seiner Bahn constant, aber die Geschwindigkeit verschieden, so erscheint die Lichtlinie an den Punkten am hellsten, wo die Geschwindigkeit am geringsten ist. An solchen Stellen nämlich verweilt der helle Punkt verhältnissmässig längere Zeit, und sein Licht wirkt deshalb auch längere Zeit auf die entsprechenden Stellen der Netzhaut als an Stellen grösserer Geschwindigkeit. Beobachtet man z. B. eine beleuchtete schwingende Saite, so erscheint diese am hellsten, da wo sie am weitesten von der Gleichgewichtslage entfernt ist, und wo ihre Geschwindigkeit für einen Augenblick gleich Null wird.

Hierher gehören auch die eigenthümlichen Wirkungen intermittirender Beleuchtung, welche am schärfsten bei den regelmässig wiederholten Funken der magnetelektrischen Inductionsapparate auftreten, sowohl bei denen mit rotirendem Anker, wie bei den Neef'schen Apparaten mit schwingender Feder. Jeder einzelne Funken dieser Apparate hat eine unbestimmbar kurze Dauer, welche im Vergleich mit der Dauer aller Bewegungen materieller Körper unendlich klein erscheint, doch ist das Licht dieser Funken stark genug, um in dieser ausserordentlich kurzen Zeit einen wahrnehmbaren Eindruck auf die Netzhaut zu machen. Bei der Erleuchtung durch einen einzelnen elektrischen Funken erscheinen alle bewegten Körper stillstehend. Das Auge kann sie natürlich nur so wahrnehmen, wie sie sich in dem Momente verhielten, wo sie beleuchtet waren, von ihrer Stellung vor und nach diesem Momente erfährt es nichts. Ist nun die Dauer der Beleuchtung so kurz, dass während derselben keine Verschiebung des bewegten Körpers von wahrnehmbarer Grösse eintreten konnte, so erscheinen seine Umrisse ganz so scharf begrenzt, wie es bei vollkommener Ruhe der Fall sein würde.

Wenn sich nun eine Reihe von elektrischen Funken in sehr kleinen Zwischenzeiten folgt, so erscheinen ruhende Körper bei dieser Beleuchtung ganz so, wie bei continuirlichem Lichte, bewegte Körper aber erscheinen mehrfach. Jeder einzelne Funke zeigt nämlich den bewegten Körper in der Lage, die er in dem betreffenden Augenblicke einnimmt, und da alle diese Eindrücke einen Augenblick dauern, so sind sie alle gleichzeitig vorhanden, und lassen den bewegten Körper als mehrfach vorhanden erscheinen. Je schneller die Bewegung des

gesehenen Körpers ist, desto weiter rücken seine Bilder auseinander, weil der Weg, den er während jeder Intermission des Lichts zurücklegt, grösser wird.

Ebenso erscheinen nun mehrfache Bilder, wenn nicht die Objecte, sondern das Auge bewegt wird. Wenn sich im Gesichtsfelde ein continuirlich leuchtender Punkt befindet, und wir das Auge bewegen, so rückt dabei das Bild des lichten Punktes auf eine andere Stelle der Netzhaut hinüber. Während der Bewegung trifft es nach einander alle continuirlich an einander stossenden Punkte einer Linie, die den Ort seiner ersten und seiner letzten Lage verbindet; alle diese Punkte werden erregt, und es muss dadurch für einen Augenblick die Empfindung in der Netzhaut entstehen, welche bei ruhendem Auge eine lichte Linie hervorbringen würde. Gewöhnlich achten wir nicht auf diese Empfindung, weil sie eben jede Bewegung des Auges bei der Gegenwart lichter Objecte im Gesichtsfelde begleiten muss, wir bemerken es aber, wenn ungewöhnlicher Weise bei intermittirendem Lichte die Continuität dieser Linie unterbrochen ist. Benutzen wir als lichtes Object die Stelle des Inductionsapparates, wo die Funken überschlagen, so erscheint bei Bewegungen des Auges der helle Punkt vervielfältigt. Denken wir uns nämlich auf der Netzhaut die Linie gezeichnet, welche das Bild der Funkenstelle beschreibt, so werden von den intermittirenden Funken nur einzelne Stellen dieser Linie erregt, denen entsprechend wir Bilder in das Gesichtsfeld projiciren.

Wenn ein bewegter Körper, den wir bei intermittirendem Lichte betrachten, eine in sich zurücklaufende Bahn beschreibt, und zur Zeit jedes Aufblitzens genau an derselben Stelle sich befindet, so erscheint er einfach und stillstehend. Zum Beispiel erscheint die schwingende Feder oder der rotirende Anker der bekannten magnetelektrischen Inductionsapparate beim Lichte ihrer eigenen Funken stillzustehen. Dasselbe geschieht, wenn irgend ein anderer Körper von periodisch veränderlicher Gestalt durch intermittirendes Licht beleuchtet wird, und die Beleuchtung immer mit denselben Phasen seiner Veränderung zusammentrifft, z. B. wenn ein Wasserstrahl, der sich in Tropfen auflöst, so beleuchtet wird, dass im Moment der Beleuchtung ein neuer Tropfen immer wieder genau an derselben Stelle ist, so sieht der Beobachter den Strahl in stillstehende Tropfen aufgelöst. Dies geschieht, wenn die Periode der Beleuchtung genau gleich ist der Periode der Tropfenbildung oder einem Multiplum derselben. Fällt die Periode der Beleuchtung nicht genau zusammen mit der Periode der Tropfenbildung, oder einem Multiplum derselben, sondern ist jene ein weniges länger, so tritt eine scheinbare langsame Bewegung der Tropfen ein, welche die wirkliche Bewegung nachahmt, aber mit sehr verringerter Geschwindigkeit. Es werden dann von den folgenden Funken nicht genau dieselben Phasen der Tropfenbildung beleuchtet, wie von dem ersten, sondern immer weiter fortgeschrittene Zustände der folgenden Perioden dieser veränderlichen Erscheinung. Ist die Periode der Beleuchtung dagegen etwas kürzer, als die Periode der Tropfenbildung oder ein Multiplum derselben, so sieht der Beobachter die Erscheinung rückwärts vor sich gehen. Die Tropfen steigen zum Strahle hinauf und gehen in diesen über. Durch diese Verhältnisse wird es möglich, diese und andere periodische Erscheinungen, welche so schnell vor sich

gehen, dass der Beobachter sie mit dem Auge nicht unmittelbar erkennen kann, in ihren einzelnen Stadien sichtbar zu machen und zu analysiren. Einige künstlich hervorgebrachte Erscheinungen derselben Art werden unten bei Beschreibung der Apparate auseinandergesetzt werden.

Die Dauer des Lichteindrucks auf das Auge bestimmt man am leichtesten mit Hülfe von Farbenscheiben, die eine veränderliche und messbare Umlaufsgeschwindigkeit haben. Mit Sicherheit lässt sich dabei nur die Umlaufsgeschwindigkeit bestimmen, welche nöthig ist, um der Scheibe ein ganz gleichmässiges Ansehen zu geben. Es zeigt sich dabei, dass sie desto grösser gemacht werden muss, je grösser die Lichtstärke ist. Auch scheinen die verschiedenen Farben dabei Unterschiede zu zeigen. Plateau liess bei gewöhnlichem Tageslichte eine mit 12 weissen oder farbigen und 12 gleich breiten schwarzen Sectoren versehene Scheibe rotiren. Die Dauer des Vorübergangs eines schwarzen Sectors war also der 24. Theil der Umlaufszeit der Scheibe. Diese Zeit war, wenn die Scheibe einen gleichmässigen Eindruck machte

	Plateau.	Emsmann. [1]
Für Weiss	0,191 Secunden	0,25 Secunden
„ Gelb	0,199 „	0,27 „
„ Roth	0,232 „	0,24 „
„ Blau	0,295 „	0,22 bis 0,29.

Auf die Vergleichung der verschiedenen Farben wird hierbei kaum viel Werth gelegt werden können, da ein Mittel ihre scheinbare Helligkeit genau gleich zu machen fehlte, und die Helligkeit einen sehr grossen Einfluss auf die Dauer der Nachwirkung hat. Man erkennt dies leicht, wenn man einige Fuss entfernt von einer Lampe einen Farbenkreisel in Bewegung setzt, dessen Geschwindigkeit eben hinreicht einen gleichmässigen Eindruck zu erzeugen, und dann die Lampe nähert, sogleich fängt die rotirende Fläche wieder an zu flimmern. Bei directer Sonnenbeleuchtung muss man noch grössere Drehungsgeschwindigkeiten anwenden. Uebrigens sind Plateau's Zahlen auffallend gross. Ich selbst finde, dass bei stärkstem Lampenlicht, welches eine Scheibe mit gleich breiten weissen und schwarzen Sectoren beleuchtet, der Vorübergang des Schwarz nur etwa $^1/_{48}$ Secunde und auch bei sehr schwacher Beleuchtung im Lichte des Vollmonds nur $^1/_{20}$ Secunde dauern darf, wenn alles Flimmern aufhören soll. Uebrigens hat Plateau schon bemerkt, dass wenn man das Verhältniss zwischen der Breite der weissen und der der schwarzen Sectoren verändert, aber die Zahl der Sectoren constant lässt, die Umlaufszeit dieselbe ist, bei der der Eindruck gleichmässig wird. Man kann dies sehr leicht nachweisen durch eine Scheibe, wie *Fig. 159*, Seite 345, an welcher die schwarzen Sectoren nach der Mitte, die weissen am Rande breiter sind. Das Flimmern hört bei steigender Umlaufsgeschwindigkeit in allen Abtheilungen der Scheibe nahe gleichzeitig auf. Bei breiteren weissen Sectoren ist die Empfindung stärker, und sinkt deshalb schneller, sobald der Reiz fortfällt, daher die Pause, d. h. die Breite des schwarzen Sector kleiner sein muss, als bei schmaleren weissen Sectoren. Es

[1] Pogg. Ann. XCI. 611.

ist also wohl besser, bei den Messungen nach der Grösse einer ganzen Periode der Beleuchtungsänderung zu fragen, d. h. nach der Summe der Dauer des Vorübergangs eines weissen und schwarzen Sectors. Diese ist in meinen Versuchen bei stärkstem Lampenlicht also $^1/_{24}$, bei schwachem Licht $^1/_{10}$ Secunde gewesen. Lissajou, welcher den Weg eines sehr hellen Lichtpunktes beobachtete, der die Bewegungen schwingender Stimmgabeln mitmachte, fand der helleren Beleuchtung entsprechend eine noch kürzere Zeit, nämlich $^1/_{30}$ Secunde für die Zeit, während welcher die ganze Curve continuirlich erschien.



Fig. 139.

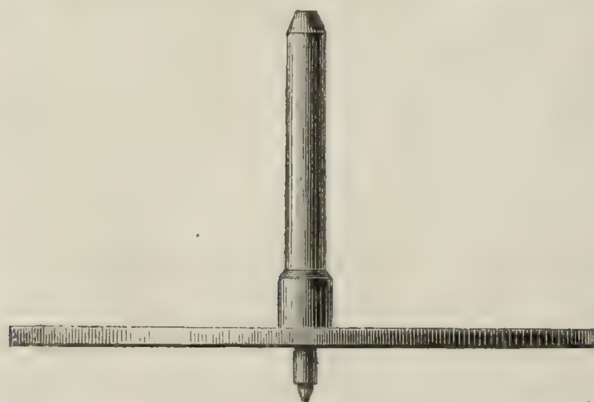
Soll also eine rotirende Scheibe einen ganz gleichmässigen Eindruck machen, so muss man sie 24 bis 30 Mal in der Secunde umlaufen lassen. Aber man kann dasselbe auch durch geringere Umlaufsgeschwindigkeiten erreichen, wenn man die Zeichnung in gleichen Winkelabständen regelmässig wiederholt. So wird z. B. auf der Scheibe *Fig. 137* das Schwarz und Weiss der 8 Sectoren des äussersten Ringes sich schon bei 6 Umläufen der Scheibe zu gleichmässigem Grau verbinden, das des mittleren Rings erst bei 12, das des innersten erst bei 24 Umläufen. Schwerer ist es, die Zeit zu bestimmen, während welcher der Eindruck in abnehmender Stärke nachdauert, ehe er ganz verlischt. Auch diese Zeit ist von der Lichtstärke abhängig, wie schon das früher Gesagte erkennen lässt. Die Nachdauer des hellen Sonnenbildes kann selbst bis zu einigen Minuten dauern. Während also die Wirkung hellen Lichts im Anfang am schnellsten abnimmt, hat sie doch im Ganzen die längste Dauer, ähnlich wie ein heisser Körper in kühler Umgebung um desto mehr Temperaturgrade in gleicher Zeit sich abkühlt, je heisser er ist, aber auch desto längere Zeit braucht, ehe er seine höhere Temperatur ganz verloren hat. Plateau hat an seinen Farbenscheiben auch in dieser Beziehung Messungen angestellt, welche die Zeit des Vorübergangs eines schwarzen Sectors ergeben, wenn die Farbe der hellen Sectoren sich über die schwarzen so ausgebreitet hatte, dass das Schwarz nirgends mehr rein erschien. Es ergab sich

für Weiss	0,35	Secunden
für Gelb	0,35	„
für Roth	0,34	„
für Blau	0,32	„

Eine verschiedene Dauer der Nachwirkung für die verschiedenen Farben zeigt sich auch noch in den Farbenveränderungen, welche das Nachbild eines weissen Lichts auf dunklem Grunde erleidet, ehe es ganz verschwindet. Da sich diese Erscheinungen aber mit denen, welche im folgenden Paragraphen beschrieben werden sollen, mannigfaltig vermischen, so möge erst dort ihre genauere Beschreibung folgen.

Aus den in diesem Paragraphen geschilderten Thatsachen geht hervor, dass Licht, welches die Netzhaut getroffen hatte, im Sehnervenapparate eine primäre Wirkung hinterlässt, die erst in den nächstfolgenden Augenblicken sich in Empfindung umsetzt. Die Grösse der primären Veränderung, die ein momentaner Lichteindruck zurücklässt, hängt nur von der Quantität Licht ab, die auf den betreffenden Theil der Netzhaut gefallen ist, wobei es einerlei ist, ob sehr intensives Licht eine kurze Zeit, oder schwächeres eine längere Zeit gewirkt hat, vorausgesetzt nur, dass die Zeit der Einwirkung überhaupt kleiner als $\frac{1}{30}$ Secunde gewesen ist. Die augenblickliche primäre Wirkung sehr intensiven Lichts fällt also nicht verhältnissmässig schwächer aus, als die mässigen Lichts, wie dies doch bei dauernder Empfindung des Lichts von verschiedener Stärke der Fall ist.

Es liegt hierin kein Widerspruch, wie es wohl scheinen könnte, denn den Mangel der Proportionalität fanden wir zwischen der objectiven Lichtintensität und der fertig ausgebildeten Empfindung, hier haben wir es dagegen nur zu thun mit der augenblicklichen primären Wirkung, die erst später in Empfindung übergehen wird, und es ist kein Hinderniss anzunehmen, dass die augenblickliche primäre Wirkung in der Nervenmasse einem anderen Gesetze der Grösse folge, als die secundäre Wirkung, die Empfindung. Das ganze Verhältniss wird vielleicht am klarsten durch den Vergleich mit einem Magneten, der in einem galvanischen Multiplicator aufgehängt ist, und durch einen intermittirenden Strom von hinreichend schnellen Intermissionen abgelenkt wird. Auch in diesem Falle hängt die Ablenkung nur ab von der gesammten Menge von Elektricität, welche in der Zeiteinheit durch den Draht fliesst, ohne doch dieser Menge proportional zu sein. Auch hier existirt aber eine der Elektricitätsmenge jedes einzelnen momentanen Stromes proportionale Wirkung, nämlich die kleine Geschwindigkeit, welche er dem Magneten im Sinne der Ablenkung mittheilt, und welche bis zum Eintritt des nächsten Stromes durch die Wirkung des Erdmagnetismus wieder aufgehoben sein muss, wenn die Ablenkung des Magneten constant bleiben soll. Der Magnet erscheint continuirlich ruhend abgelenkt, wenn die Schwankungen in seiner Lage, welche die einzelnen Stromstösse hervorbringen, zu klein sind, um wahrgenommen zu werden, und ein intermittirendes Licht giebt eine continuirliche Empfindung, wenn die Schwankungen in der Stärke der Empfindung kleiner sind, als die kleinsten wahrnehmbaren Stufen der Empfindung.


Fig. 140.

Was die Einrichtung der rotirenden Scheiben betrifft, welche Muschenbroek[1] zuerst erwähnt, so sind die einfachsten die Kreisel. Ich pflege für die meisten Versuche einen einfachen aus Messing gedrehten Kreisel zu benutzen, dessen Querschnitt in *Fig. 140* in $\frac{1}{3}$ Grösse dargestellt ist. Er wird mit der Hand in Bewegung gesetzt. Man kann ihn deshalb in jedem Augenblicke leicht und ohne Vorbereitung in Bewegung setzen, seine Geschwindigkeit nach Belieben verstärken oder mässigen, aber allerdings entspricht

[1] Introductio. §. 1820.

das Maximum der Geschwindigkeit, was man ihm mit den Fingern mittheilen kann, nur ungefähr 6 Umdrehungen in der Secunde, wonach er 3 bis 4 Minuten in Bewegung bleibt. Wegen der geringen Rotationsgeschwindigkeit bekommt man einen ganz gleichmässigen Lichteindruck nur wenn die Scheiben in 4 oder 6 Sectoren getheilt, und in jedem die gleiche Vertheilung von Farben, Licht und Schatten angebracht ist. Ist die Zahl der gleichen Wiederholungen der Zeichnung eine geringere, so giebt es wenigstens bei starker Beleuchtung ein mehr oder weniger schillerndes Ansehen der Scheibe. Die Zeichnungen kann man selbst während des Ganges der Scheibe leicht darauf werfen, und kann auch leicht Veränderungen hervorbringen, wenn man auf eine volle Scheibe eine mit ausgeschnittenen Sectoren wirft, deren Lage auf der unteren man durch Hinstreifen mit den Fingern oder durch Blasen mit dem Munde verändern kann; so lassen sich während des Ganges der Scheibe sehr mannigfaltige Variationen hervorbringen.

Giebt man der Scheibe z. B. gleich breite blaue und rothe Sectoren, und legt darauf eine Scheibe mit gleich breiten Sectoren, von denen man den ersten, dritten, fünften u. s. w. schwarz gemacht hat, während der zweite, vierte, sechste u. s. w. fortgeschnitten ist, so wird bei der Rotation die ganze Scheibe blau sein, wenn die schwarzen Sectoren der oberen Scheibe auf die rothen der unteren fallen, und diese verdecken, dagegen wird die Scheibe roth erscheinen, wenn die schwarzen Sectoren der oberen Scheibe auf die blauen der unteren fallen, in den Zwischenlagen erhält man verschiedene Mischungen von Roth und Blau, und kann daher während des Ganges der Scheibe die eine Farbe allmälig in die andere übergehen lassen, wenn man durch Ueberstreifen mit dem Finger oder durch Blasen die Lage der oberen Scheibe verändert. Begrenzt man die verschiedenen Sectoren nicht durch gerade, sondern durch krumme oder gebrochene Linien, so kann man leicht sehr mannigfache und bunte Wechsel von Ringsystemen erzeugen.

Um den Kreiseln grössere Geschwindigkeit zu geben, müssen sie durch ein um ihren Stiel geschlungenes Band, welches man abzieht, in Bewegung gesetzt werden. Die einfachste Einrichtung dazu ist die in *Fig. 141* abgebildete. Es dient dazu ein hölzerner Hohlcylinder *c*,



Fig. 141.

der an einem Stiele *d* sitzt, bei *b* und *e* zwei einander gegenüberstehende Durchbohrungen seiner Mantelfläche hat, und von beiden um einen rechten Winkel entfernt einen Einschnitt. Man steckt den Stiel *b* des Kreisels durch die Oeffnungen des Cylinders, führt das Ende eines starken Fadens durch eine Durchbohrung des Stiels, und dreht mit dem Finger den Kreisel, bis der Faden aufgewickelt ist. Der Theil des Stiels, um den der Faden aufgewickelt ist, wird dadurch so dick, dass er nicht mehr aus der Hülse *c* hinausgleiten kann. Hält man nun den Kreisel mittels der Hülse nahe über einem Tische, zieht den Faden kräftig ab, so kommt der Kreisel in schnelle Rotation, und fällt, sobald der Faden abgewickelt ist, auf den

Tisch herab, wo er lange weiter läuft. Der in *Fig. 142* nach seiner Zusammensetzung abgebildete Kreisel ist so eingerichtet, dass man die Scheiben mittels des Stiels fest klemmen kann, wie dies bei den Versuchen von Maxwell zur Bestätigung des Newton'schen Gesetzes der Farbenmischung nöthig ist. Man braucht dazu eine Reihe kleinerer und grösserer runder Scheiben aus steifem Papier mit einer centralen Oeffnung und einem radialen Schlitz, wie *Fig. 143* zeigt. Jede Scheibe wird nur mit einer Farbe gleichmässig überzogen; legt man zwei oder mehrere auf einander und schiebt sie gegenseitig durch ihre Schlitze hindurch, so werden auf jeder Seite Sectoren der einzelnen Scheiben von beliebig veränderlicher Breite sichtbar, so dass das Mischungsverhältniss der Farben continuirlich geändert werden kann.

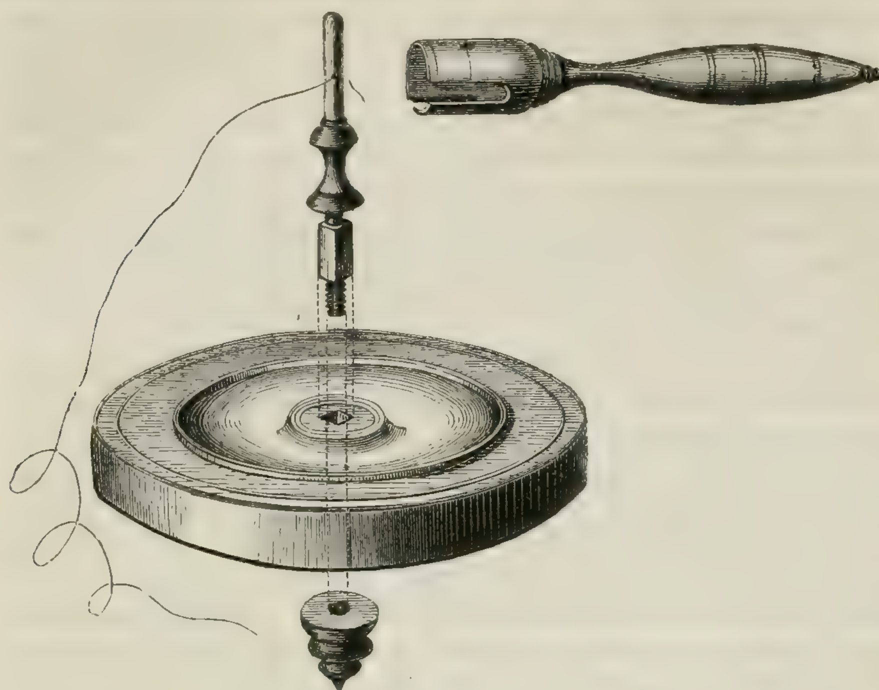


Fig. 142.

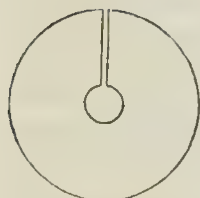


Fig. 143.

Die vollkommenste Construction für einen Kreisel, der nur bei sehr schneller Bewegung gebraucht werden soll, bietet der Busold'sche Farbenkreisel dar (*Fig. 144*). Er besteht aus einer fünf Pfund schweren Scheibe, die aus einer Legirung von Zink und Blei gegossen ist, ein Decimeter im Durchmesser. Die Axe von Messing läuft unten auf einer fein abgerundeten Spitze von nicht gehärtetem Stahl. Der cylindrische Theil der Axe ist rauh gemacht, damit die Schnur fest darauf liegen kann. Will man den Kreisel in Bewegung setzen, so wird seine Axe nach Umwickelung mit der Schnur in die Einschnitte der eisernen Arme *d d* eingelegt, ein Teller untergestellt, und mit der rechten Hand die Schnur kräftig abgezogen, während die linke sich gegen den Hebel *e* stützt. Der Kreisel muss vor dem Abziehen möglichst nah am Rande des Tellers stehen, die Schnur einen halben Fuss kürzer sein, als die ausgespannten Arme messen, und an ihrem Ende mit einer Handhabe versehen sein. Wenn der Kreisel läuft, zieht man den Teller mit dem Kreisel unter den Armen des Hebels *e* hervor. Dieser, welcher um eine Axe bei *c* drehbar ist, hebt sich dabei nach oben. Bei kräftigem Abziehen der Schnur kann man bis 60 Umdrehungen in der Secunde hervorbringen, und die Bewegung hält 45 Minuten an.

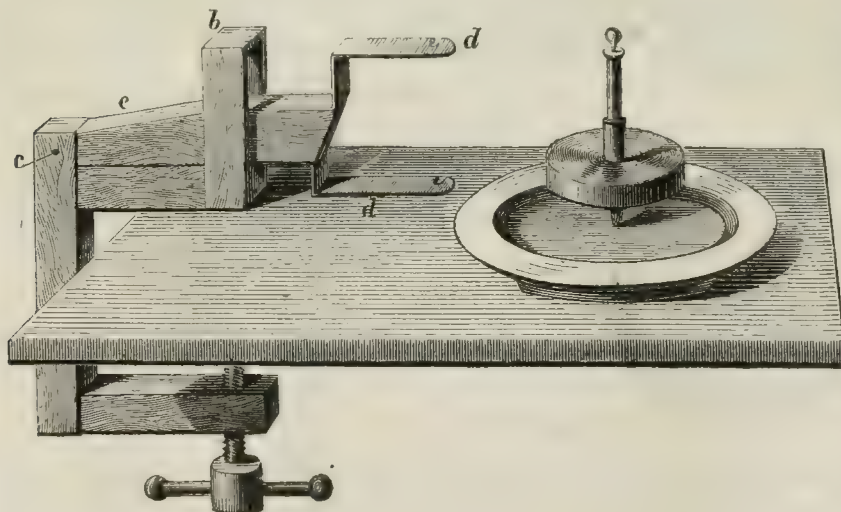


Fig. 144.

Ausser den Kreiseln hat man nun auch vielfältig Scheiben benutzt, deren Axe in zwei

Zapfenlagern läuft, und die entweder durch ein Uhrwerk, oder eine unendliche Schnur, oder durch Abziehen einer Schnur wie die Kreisel in Bewegung gesetzt werden. Im Allgemeinen tritt bei diesen Apparaten die Unbequemlichkeit ein, dass man die Scheiben nicht wechseln kann, ohne den Apparat anzuhalten und die Scheibe aus ihren Axenlagern zu entfernen. Andererseits hat man den Vortheil, die Scheibe in verticaler Stellung umlaufen lassen zu können, wobei ein grosses Auditorium sie gleichzeitig sehen kann, was bei den Kreiseln nicht so leicht zu erreichen ist. Mischung der Farben hat Montigny auch durch ein rotirendes Prisma erreicht, dessen objectives Spectrum er über einen weissen Schirm laufen liess.

Das Thaumatrop ist ein rechteckiges Täfelchen, welches man um eine Axe, die durch die Mitte der längeren Seiten geht, rotiren lässt. Auf die eine Seite ist etwa ein Vogel gemalt, auf die andere der Käfig. Wenn man schnell rotiren lässt, scheint der Vogel im Käfig zu sitzen. Es ist jetzt als Kinderspielzeug bekannt, erfunden von Dr. Paris [1].

Es schliessen sich hieran die zusammengesetzteren Apparate an, welche eine rotirende Scheibe durch gleichzeitig rotirende Spalten sehen lassen. Dazu gehören zunächst die stroboskopischen Scheiben von Stampfer, welche gleichzeitig und unabhängig von Plateau erfunden und mit dem Namen des Phänakistoskops belegt wurden [2].

Die stroboskopischen Scheiben sind Papierscheiben von 6 bis 10 Zoll Durchmesser (*Fig. 145*), auf denen sich im Kreise gestellt und in gleichen Entfernungen von einander eine Anzahl (8 bis 12) von Figuren befindet, welche eine Reihe von Momenten irgend einer periodisch wiederkehrenden Bewegung darstellen. Eine solche Scheibe wird concentrisch auf eine zweite etwas grössere dunkle Scheibe gelegt, die am Rande ebenso viel Oeffnungen hat, als die erstere Figuren, und beide zusammen mittels einer Schraubenmutter auf das vordere Ende einer kleinen eisernen Axe befestigt, die im oberen Ende eines passenden Handgriffs angebracht ist. Beim Gebrauche des Instruments stellt man sich vor einen Spiegel, wendet die Scheibe mit den Figuren gegen diesen, stellt das Auge so, dass man durch eines der Löcher am Rande der grösseren Scheibe das Spiegelbild der Figuren sieht, und setzt nun die Scheiben in Rotation. Dann scheinen die Figuren, die man im Spiegel sieht, die Bewegung auszuführen, deren Acte dargestellt sind, ohne sich dabei von der Stelle zu bewegen.

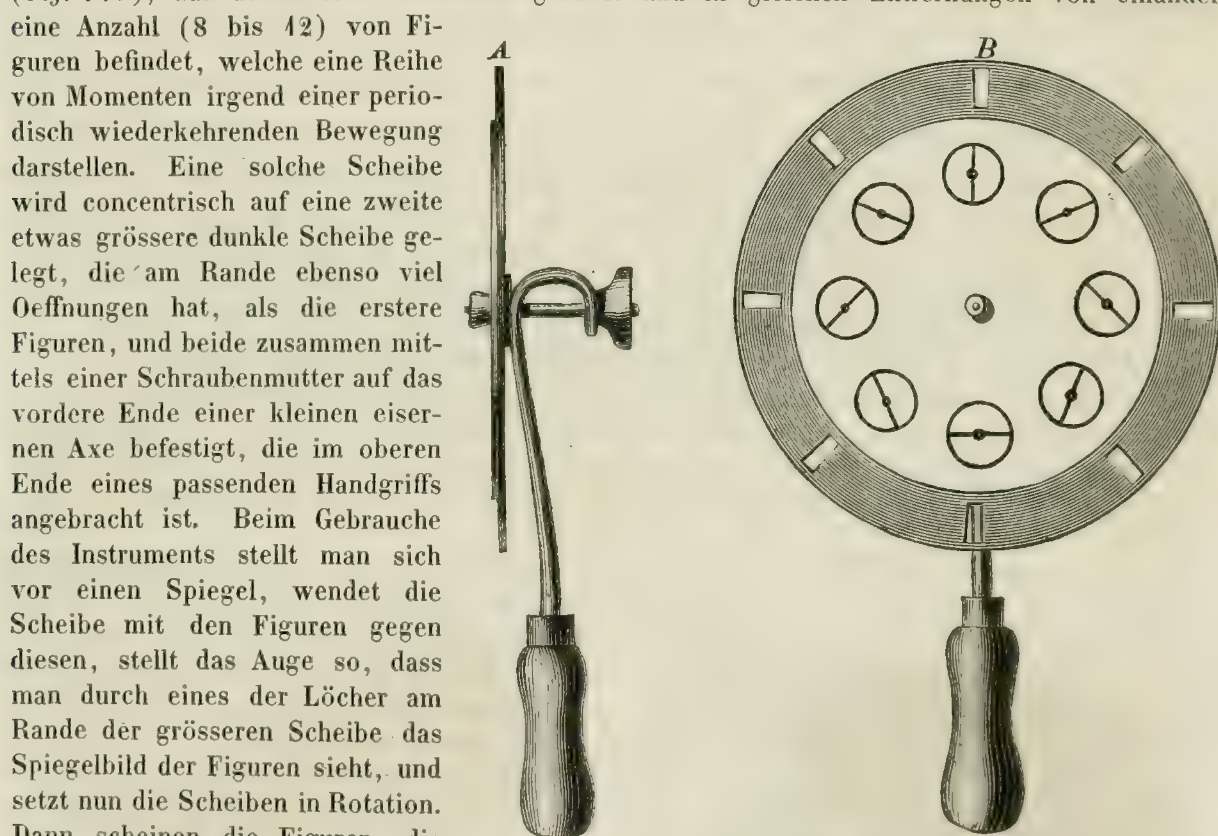


Fig. 145.

Bezeichnen wir diese Oeffnungen mit Ziffern, so dass das Auge zuerst durch die Oeffnung 1 sehe, dann, wenn die Scheibe weiter rotirt, durch die Oeffnung 2 u. s. w., und bezeichnen wir ferner die Figuren, die auf den zur Oeffnung 1, 2, 3 u. s. w. gehenden Radien stehen,

[1] *Edinb. Journal of Science.* VII. 87. Pogg. Ann. X. 480.

[2] Plateau schickte schon im November 1832 durch Quetelet ein Exemplar an Faraday; Stampfer verfertigte die erste im December 1832. Plateau beschrieb seine Erfindung in einem vom 20. Januar 1833 datirten Schreiben in der *Correspondance math. et physique de l'observat. de Bruxelles* VII. 365, Stampfer in einer besonderen Schrift: „Die stroboskopischen Scheiben oder optischen Zauberscheiben, deren Theorie und wissenschaftliche Anwendung", deren Vorrede von Juli 1833 datirt ist.

mit denselben Ziffern, so wird zunächst der Beobachter, indem er durch die Oeffnung 1 nach dem Spiegel sieht, auf dem Radius, der im Spiegelbilde der Scheibe nach dem Spiegelbilde seines Auges hinweist, die Figur 1 erblicken. Wenn er nun die Scheibe dreht, so geht die Oeffnung 1 vor seinem Auge vorbei, das Spiegelbild wird ihm zunächst durch die dunkle Pappscheibe ganz verdeckt, und erst wenn die Oeffnung 2 vor seinem Auge ankommt, erblickt er es wieder. Nun steht aber die Figur 2 an demselben Orte, wo sich vorher Figur 1 befand, nämlich auf dem Radius, der vom Mittelpunkt der Scheibe nach dem Auge des Beobachters geht. Es folgt wieder Dunkelheit, bis Oeffnung 3 vor das Auge tritt, und nun Figur 3 an demselben Platze erscheint, wo vorher 1 und 2 sich befanden. Wären nun diese Figuren alle einander gleich, so würde der Beobachter eine Reihe von einander getrennter unter sich aber gleicher Gesichtseindrücke erhalten, welche bei hinreichend schneller Wiederholung in eine andauernde Empfindung verschmelzen, die einem ruhenden Objecte entspricht. Wenn die Figuren dagegen von einander ein wenig verschieden sind, so verschmelzen die getrennten Lichteindrücke auch zu dem Bilde eines Gegenstandes, aber dieser verändert sich scheinbar fortdauernd, so wie es die Reihenfolge der Bilder mit sich bringt.

Wenn die Zahl der Figuren nicht gleich der der Löcher ist, so erscheinen die Figuren in vor- oder rückschreitender Bewegung. Denken wir uns n Löcher und m Figuren, die Zahlen m und n aber nur wenig verschieden, und zu Anfang eine der Figuren auf dem Radius stehend, der nach dem Auge des Beobachters, welches durch eine Oeffnung schaut, hinweist. Wird die Scheibe um den Bogen $\frac{2\pi}{n}$ gedreht, so tritt wieder eine Oeffnung vor das Auge des Beobachters. Die zweite Figur ist dann aber um einen Bogen $\left(\frac{2\pi}{n} - \frac{2\pi}{m}\right)$ von dem genannten Radius entfernt. Ist dieser Bogen nun klein genug, so dass die zweite Figur sich jetzt näher an dem erstgesehenen Orte der ersten Figur befindet, als jede andere jetzt sichtbare Figur, so identificiren wir die jetzt gesehene zweite mit der früher gesehenen ersten Figur, und glauben die letztere um das entsprechende Bogenstück fortbewegt zu sehen. Gewöhnlich macht man m gleich $n+1$ oder gleich $n-1$. Im ersteren Falle schreiten die Figuren in dem Sinne fort, wie die Scheibe sich dreht, im zweiten Falle entgegengesetzt.

Je schmaler man die Oeffnungen der grösseren Scheibe macht, desto schärfer begrenzt werden die Bilder gesehen, aber desto lichtschwächer werden sie auch. Um die Bilder objectiv an die Wand zu werfen, hat Uchatius [1] einen Apparat construirt. Sehr nützlich verwendet sind sie von J. Müller [2], um die Vorgänge der Wellenbewegung zu versinnlichen.

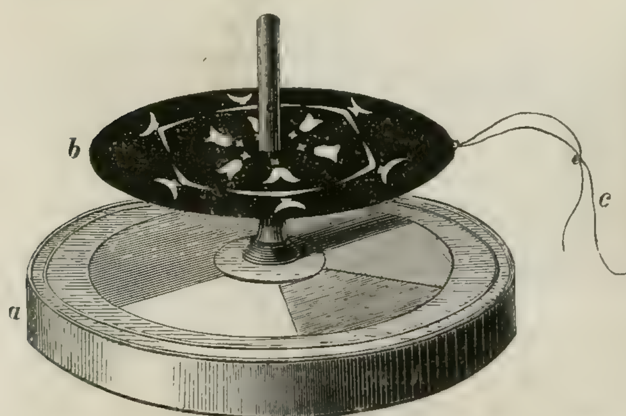


Fig. 146.

Das Dädaleum von W. G. Horner ist ein ähnliches Instrument, nur sind die Löcher auf dem Mantel eines hohlen Cylinders angebracht, und die Bilder theils auf der Innenfläche des Mantels (am besten transparent), theils auf der Grundfläche.

Bei den bisher beschriebenen Apparaten rotiren die Figuren und die Oeffnungen mit derselben Winkelgeschwindigkeit; eine andere Reihe von Erscheinungen zeigt sich, wenn sie mit verschiedener Winkelgeschwindigkeit rotiren.

Einer der einfachsten Apparate dieser Art ist der in *Fig. 141* dargestellte Kreisel von J. B. Dancer in Manchester, wenn man auf dem Vorsprung der Axe noch eine zweite Scheibe ruhen lässt, in welcher Oeffnungen verschiedener Gestalt angebracht sind, und an deren Rand

---

[1] Sitzungsberichte der k. k. Akad. zu Wien. X. 482.
[2] Pogg. Ann. LXVII. 271.

ein Stück Faden angeknüpft ist, wie es *Fig. 146* darstellt. Diese obere Scheibe rotirt mit wegen der Reibung, die sie an der Axe erleidet, aber ihre Rotation ist langsamer als die des Kreisels, wegen des grossen Luftwiderstandes an dem mit ihr herumfliegenden Faden. Enthält die untere Scheibe mehrere verschiedengefärbte Sectoren, so sieht man die in die obere Scheibe eingeschnittenen Figuren vervielfältigt und in den verschiedenen Farben der unteren Scheibe ausgeführt, ein sehr buntes Bild, was bald continuirlich, bald springend sich zu bewegen scheint.

Betrachten wir eine einzelne Oeffnung der oberen Scheibe und rechnen die Drehungswinkel von der Stelle ab, wo sie sich zu Anfang der betrachteten Zeit befindet. Ein in der verlängerten Axe des Kreisels befindliches Auge wird durch die Oeffnung eine der Farben der unteren Scheibe erblicken, und diese Stelle gelte auf der unteren Scheibe als Nullpunkt für die Messung der Winkel. Die obere Scheibe laufe m Male, die untere n Male in der Secunde um, beide in gleicher Richtung, so ist der Bogen, um den sich jeder Punkt der oberen Scheibe in der Zeit t fortbewegt gleich $2\pi m t$, und für die Punkte der unteren Scheibe ist derselbe gleich $2\pi n t$. Von zwei Punkten der oberen und unteren Scheibe, die anfangs über einander standen, ist also nach der Zeit t der untere um den Bogen $2\pi\,(n-m)\,t$ voraus, und daraus folgt, dass durch die Oeffnung der oberen Scheibe zur Zeit t ein Theil der unteren Scheibe gesehen wird, der um den Bogen $2\pi\,(m-n)\,t$ auf dieser von dem anfangs gesehenen Punkte entfernt ist, wobei positive Bogen im Sinne der Drehung, negative rückwärts zu rechnen sind. Wenn also $t = \frac{1}{n-m}$ geworden ist, werden sämmtliche Farben der unteren Scheibe einmal in der Oeffnung der oberen erschienen sein, und ihre Reihe wird wieder vom Anfang beginnen, und sich wiederholen. Während dieser Zeit ist aber die Oeffnung selbst um den Bogen $2\pi m t = 2\pi \frac{m}{n-m}$ fortgerückt, und die Reihe der Farben, wie sie sich in der Oeffnung folgten, muss über diesen Bogen ausgebreitet erscheinen, und zwar in umgekehrter Ordnung, als sie auf der Scheibe stehen, wenn, wie in dem beschriebenen Apparate der Fall ist, $n > m$. Dieselbe Reihe von Farben folgt nun wieder, während die Oeffnung sich über einen zweiten, dritten u. s. w. Bogen von der Länge $2\pi \frac{m}{n-m}$ fortbewegt. Ist nun

$$\frac{m}{n-m} = \frac{1}{p}, \quad \text{also} \quad n = (p+1)\,m$$

und p eine ganze Zahl, so wird sich nach einem ganzen Umlauf der oberen Scheibe die Farbenreihe in der Oeffnung gerade p Male wiederholt haben, und bei jedem folgenden Umlauf, wie beim ersten, genau an derselben Stelle wieder erscheinen. Es erscheint dann auf der oberen Scheibe ein ruhender farbiger Ring, mit p maliger Wiederholung der Farben der unteren Scheibe. Ist p nicht genau gleich einer ganzen Zahl, so werden die Orte der Farben beim zweiten Umlaufe nicht mehr ganz genau mit denen des ersten Umlaufs zusammenfallen, der Farbenring wird sich fortzubewegen scheinen.

Wenn

$$\frac{m}{n-m} = \frac{2}{2p+1}, \quad \text{also } n = \left(p + \frac{3}{2}\right) m$$

und p eine ganze Zahl ist, so werden beim zweiten Umlaufe die Farben neue Orte einnehmen, beim dritten aber dieselben wie beim ersten, beim vierten wie beim zweiten, so dass doch eine ruhende Farbenerscheinung entstehen kann, wenn nur der Kreisel schnell genug läuft, dass der Eindruck auf das Auge die Zeit zweier Umläufe der Oeffnung überdauert. Man erhält dann eine $(2p+1)$ malige Wiederholung der gleichen Farbenfolge, diese selbst ist aber nicht mehr gleich der Folge der Farben der unteren Scheibe, sondern stellt die Mischungen je zweier Farben dieser Scheibe dar, welche auf den entgegengesetzten Hälften derselben Durchmesser liegen. Wenn z. B. $p = 1$ also $\frac{m}{n-m} = \frac{2}{3}$, so wird die Anfangsfarbe wiedererscheinen bei

0^0		
240		
480	d. h.	120^0
720	„	0
960	„	240
u. s. w.,		

also immer wieder bei 0^0, 120^0, 240^0. Die Farbe dagegen, welche auf der unteren Scheibe auf der anderen Hälfte desselben Durchmessers steht, wird in der Mitte dieser Bogen erscheinen, also bei

120^0		
360	d. h. bei	0^0
600	„	240
u. s. w.,		

also an denselben drei Stellen, wird sich also mit der ersten Farbe mischen.

Im Allgemeinen ergiebt sich leicht, dass wenn der Bruch $\frac{m}{n-m}$ in kleinsten ganzen Zahlen ausgedrückt gleich $\frac{q}{p}$ ist, und der Eindruck im Auge q Umdrehungen der oberen Scheibe überdauert, man p Wiederholungen einer Folge von Farben sieht, die entstehen, indem je q äquidistante Farben der unteren Scheibe gemischt werden. Dauert der Eindruck im Auge aber nicht so lange, so erscheinen die Farben hin- und herspringend.

Wenn man die Form, Zahl und Grösse der Oeffnungen in der oberen Scheibe variirt, entstehen auf diese Weise natürlich sehr bunte kaleidoskopische Bilder. Diese Bilder werden bei der beschriebenen Einrichtung noch bunter und erhalten sehr feine Zeichnungen dadurch, dass eigenthümliche Oscillationen der oberen Scheibe eintreten. Man hört nämlich ein lautes Schnarren des Kreisels, sobald man die obere Scheibe aufgelegt hat, und wenn man als untere Scheibe eine rein weisse gewählt hat, so sieht man die Figur der oberen Scheibe nicht sich in ein System concentrischer Kreislinien verwandeln, wie es sein müsste, wenn die obere Scheibe mit gleichmässiger Geschwindigkeit rotirte, sondern man sieht eine grosse Zahl von Wiederholungen der eingeschnittenen Figur. Dies lässt schliessen, dass die Rotationsbewegung der oberen Scheibe in regelmässiger Abwechselung verzögert und beschleunigt ist. Diese Oscillationen müssen durch die Reibung der oberen Scheibe an der Axe hervorgebracht sein. Ausserdem findet ein zweites System von Oscillationen statt, wobei der Mittelpunkt der oberen Scheibe horizontal hin- und hergeht; was man aus gewissen Eigenthümlichkeiten der Figur, wie sie über weisser Unterlage erscheint, erkennen kann.

Regelmässiger zeigt das von Plateau construirte Anorthoskop diese Erscheinungen. Zwei kleine Rollen von verschiedenem Durchmesser, deren Axen in derselben geraden Linie unmittelbar hinter einander liegen, werden durch zwei unendliche Schnüre herumgetrieben, welche beide um die Peripherie derselben grösseren Scheibe laufen; letztere wird mittels einer Kurbel bewegt. An der einen Rolle ist eine transparente Scheibe befestigt, auf der sich eine verzerrte Zeichnung befindet, an der anderen eine schwarze Scheibe mit einem oder mehreren Spalten. Wenn man die Scheiben rotiren lässt, kommt die richtige Zeichnung zum Vorschein.

Wir haben gesehen, dass wenn m die Zahl der Umläufe des Schirms in der Secunde bezeichnet, und n die der Zeichnung, dass auf einem Bogen $2\pi\frac{m}{n-m}$, den ein Punkt der spaltförmigen Oeffnung des Schirms durchläuft, alle die Punkte der Zeichnung der Reihe nach erscheinen, die ebenso weit wie jener Punkt vom Mittelpunkte entfernt sind. In dem Zerrbilde des Objects auf der transparenten Scheibe nehmen aber diese Punkte die ganze Peripherie ein. Denkt man sich also in dem Original und seinem Zerrbilde die Punkte durch Polarcoordinaten gegeben, nämlich durch ihre Entfernung vom Mittelpunkte der Scheibe ϱ und durch den Winkel ω, den der Radius Vector mit einem festen Radius bildet, und nennen wir ϱ_0 und ω_0 die Werthe für die richtige Zeichnung, ϱ_1 und ω_1 für die verzerrte, so ist

$$\varrho_0 = \varrho_1$$
$$\omega_0 : \omega_1 = m : (m-n).$$

Mit Hülfe dieser Gleichungen kann die verzerrte Zeichnung construirt werden, indem man die Winkel ω in dem angegebenen Verhältnisse verändert. Damit bei jedem Umlauf der Scheiben dieselben Figuren wieder sichtbar werden, muss wie früher der Bogen $2\pi \frac{m}{m-n}$ ein aliquoter Theil der Peripherie sein, also $\frac{m}{m-n}$ eine positive oder negative ganze Zahl.

Sind die Scheiben beide gleichläufig, also m und n positiv, $n > m$, so haben ω_0 und ω_1 entgegengesetztes Zeichen, müssen also nach entgegengesetzter Richtung gelegt werden. Es wird $\frac{m-n}{m} = 1 - \frac{n}{m}$ eine negative ganze Zahl, wenn $\frac{n}{m}$ eine ganze Zahl p ist, d. h. die transparente Scheibe p ganze Umläufe macht, während die dunkle Scheibe einen macht. Das Bild wiederholt sich $(p-1)$ Male auf dem Umfang der Scheibe. Man kann in diesem Falle p äquidistante radiale Spalten in der schwarzen Scheibe anbringen.

Wenn die beiden Scheiben in entgegengesetzter Richtung umlaufen, also $m = -\mu$ ist, so wird

$$\omega_0 : \omega_1 = \mu : (n + \mu).$$

Die beiden Winkel sind also nach der gleichen Seite hin zu nehmen. Wenn $\frac{n}{\mu} = p$ und p eine ganze Zahl, so wird die Zahl der Bilder gleich $p + 1$, und man kann wieder p Spalten in der dunklen Scheibe anbringen.

Wenn endlich die Rotationen gleichläufig sind, m und n also positiv, aber $m > n$, so bekommen ω_0 und ω_1 wieder dasselbe Zeichen, aber während in den bisherigen Fällen ω_1 gleich oder grösser als ω_0 war, wird es nun kleiner. In den bisher beschriebenen Fällen konnte das Zerrbild die ganze Peripherie des Kreises einnehmen, jedes einzelne richtige Bild nahm dann nur einen aliquoten Theil der Peripherie ein. In dem jetzigen Falle aber ist der höchste Werth von ω_0 offenbar 2π, und demgemäss der höchste von $\omega_1 = \left(1 - \frac{n}{m}\right) 2\pi$. Es kann das Zerrbild deshalb auch auf der transparenten Scheibe mehrmals wiederholt werden, ja es wird vortheilhaft sein, es zu wiederholen, um mehr Licht zu erhalten. Damit dann immer dieselbe Erscheinung wiederkehre, muss der bezeichnete Maximalwerth von ω_1 ein aliquoter Theil der Peripherie sein, d. h. $\frac{m}{m-n}$ muss eine ganze Zahl p sein, also

$$\frac{n}{m} = \frac{p-1}{p}.$$

Dabei ist die Anzahl der möglichen Wiederholungen des Zerrbildes p, das richtige Bild einfach. Die Zahl der Spalten kann gleich $p - 1$ gemacht werden.

Man kann aber auch in diesem Falle die Spalte einfach lassen, und das Zerrbild in seinen Wiederholungen etwas verändern, so dass es verschiedene Momente einer Bewegung darstellt, dann erhält man ein richtiges Bild, was diese Bewegung auszuführen scheint.

Sollen die geforderten Verhältnisse der Umdrehungszahlen m und n genau eingehalten werden, so kann man dies nur erreichen, wenn man die Axen durch Zahnräder in Bewegung setzt. Bei den Rollen stimmen die Verhältnisse der Durchmesser und die Beschaffenheit der Fäden nie so genau überein, dass nicht allmälig kleine Abweichungen von dem geforderten Verhältnisse eintreten, und dann drehen sich die restaurirten Bilder auf der Scheibe allmälig um deren Mittelpunkt. Diese unvermeidliche Ungenauigkeit der Schnurläufe hat Plateau übrigens benutzt, um einen sehr allmäligen Farbenwandel hervorzubringen, indem er zwei Rollen aufsetzt, welche, so gut es geht, einander gleich gemacht sind, an der einen eine transparente Scheibe mit gleich breiten farbigen Sectoren befestigt, an der anderen eine schwarze Scheibe, in der ein oder zwei gleiche Sectoren ausgeschnitten sind. Wenn die Oeffnung anfangs gerade vor einem der farbigen Sectoren der hinteren Scheibe steht, wird bei der Rotation das ganze Feld in dieser Farbe erscheinen, allmälig aber werden sich die Scheiben gegen einander

verschieben, es wird von einem anderen Sector der farbigen Scheibe anfangs wenig, allmälig immer mehr frei werden, und dessen Farbe daher sich stärker und stärker einmischen, während die des ersten in demselben Verhältnisse verschwindet. So erhält man einen sehr leise und allmälig eintretenden Farbenwandel.

Es gehören hierher auch noch gewisse Curven, welche erscheinen, wenn zwei Reihen von geraden oder gekrümmten Stäben sich hinter einander bewegen. Das erste Beispiel davon, welches Aufsehen erregte, waren gewisse Figuren, welche an den Rädern eines Wagens erscheinen, wenn ein solcher hinter einem Gitter vorbeifährt [1]. Am einfachsten von den hierher gehörigen Fällen ist die von Faraday beobachtete Erscheinung. Er liess zwei gleiche Zahnräder hinter einander in entgegengesetzter Richtung schnell rotiren, so dass ihre Axen in einer geraden Linie lagen. Während nun von jedem einzeln gesehen die Zähne wegen der Schnelligkeit der Bewegung verschwinden, sah er ein Rad mit doppelt so viel Zähnen stillstehend, wenn er sie so betrachtete, dass die eine Zahnreihe durch die andere hin erschien. Denken wir uns die Zähne hell auf dunklem Grunde, so wird durch die schnell umlaufenden hellen Zähne jedes einzelnen Rades eine gewisse Menge Licht über den Grund scheinbar gleichmässig ausgebreitet, und durch beide Zahnreihen zusammen die doppelte Menge Licht an solchen Stellen des Grundes, wo hinter einander bald von der einen, bald von der anderen Reihe ein Zahn hinüberläuft. Wo aber ein Zahn der vorderen Reihe einen solchen der hinteren deckt, wird für den Augenblick das Licht des hinteren hinweggenommen, weil es nicht zum Auge des Beobachters kommen kann, und eine solche Stelle scheint dem Beobachter deswegen nur halb so stark beleuchtet, als die benachbarten, wo die beiden Zähne ungestört nach einander ihr Licht in das Auge senden. Somit erscheinen in dem hellen Scheine, den die Zahnreihen geben, diejenigen Stellen dunkler, wo bei der Bewegung der Räder je zwei Zähne zur Deckung kommen. Ist nun ω der Winkelabstand der Zähne, und gehen wir von einer Stellung der Räder aus, wo die Zähne sich decken, so wird eine zweite Deckung zu Stande kommen, wenn das eine Rad sich um $\frac{1}{2}\omega$ nach rechts, das andere um ebenso viel nach links gedreht hat. Die dunklen Streifen werden also nur den Winkelabstand $\frac{1}{2}\omega$ haben, und ihre Anzahl wird daher doppelt so gross sein, als die der Zähne. Das eine Rad kann man auch weglassen, wie Billet Sélis bemerkt, wenn man hinter das erste einen Hohlspiegel stellt, der ein mit dem Objecte zusammenfallendes aber verkehrtes Bild dieses Rades entwirft. Sehr hübsch lässt sich auch diese Methode anwenden, um die Art, wie sich ein Wasserstrahl in Tropfen auflöst, sichtbar zu machen.

Eine ähnliche Erscheinung beobachtete Emsmann an dem bekannten Abplattungsmodell, welches aus zwei elastischen Messingringen besteht, die zwei gegen einander senkrechten Meridiankreisen der Erde entsprechen, und um die der Erdaxe entsprechende Linie schnell gedreht werden, wobei sie durch die Centrifugalkraft eine elliptische Gestalt annehmen. Da sie das Licht stark reflectiren, verbreiten sie bei schneller Rotation einen Lichtschein über die Kugelfläche, die sie beschreiben, und darin erscheinen dunkle Linien an den Stellen, wo bei der Rotation ein vorderes Bogenstück ein hinteres bedeckt. Das allgemeine Princip dieser Erscheinungen hat Plateau ausgesprochen. Wenn zwei erleuchtete Curven sich durch das Gesichtsfeld so schnell bewegen, dass sie eine scheinbar continuirliche Beleuchtung der Fläche zurücklassen, so erscheint eine dunkle Linie in diesem lichten Felde, welche die Punkte verbindet, in denen sich nach einander die Curven geschnitten haben, vorausgesetzt, dass das Licht der einen Curve die andere nicht durchdringen kann.

Die Dauer des Lichteindrucks wurde von Newton [2] gleich einer Secunde geschätzt, später genauer gemessen von Segner [3], der 30 Tertien, d'Arcy [4], der 8 Tertien, Cavallo [5],

---

[1] Roget in *Phil. Transact.* 1825. I. 131. Pogg. Ann. V. 93. Plateau ebenda XX. 319. Faraday ebenda XXII. 601. Emsmann ebenda LXIX. 326.

[2] *Optice.* Quaestio XVI.

[3] De raritate luminis. Gott. 1740.

[4] *Mém. de Paris.* 1765. p. 450.

[5] Naturlehre übers. von Trommsdorf III. 132.

der 6 Tertien als längste Dauer des Eindrucks einer im Kreise geschwungenen glühenden Kohle fand. PARROT [1] fand, dass der Eindruck in einem hellen Zimmer kürzere Zeit währe, als in einem dunkeln. Daran schliessen sich denn die späteren Messungen von PLATEAU [2] über die verschiedene Dauer der Eindrücke verschiedener Farben, und EMSMANN [3].

Farbenkreisel erwähnt MUSSCHENBROEK [4], ohne einen älteren Beobachter zu nennen. Besondere Formen sind beschrieben durch E. G. FISCHER [5], LÜDICKE [6], BUSOLT [7].

Die fast gleichzeitige Erfindung der stroboskopischen Scheiben durch PLATEAU und STAMPFER zu Ende des Jahres 1832 ist schon oben erwähnt. Die Construction des Anorthoskops durch PLATEAU [8] fällt in den Januar 1836. Letzterer hat auch die Theorie der hierher gehörigen Erscheinungen vielfältig und ausführlich bearbeitet.

1704. I. NEWTON. *Optice.* Quaestio XVI.
1740. SEGNER. De raritate luminis. Gottingae 1740.
1760. MUSSCHENBROEK. Introductio ad philos. natur. §. 1820.
1765. D'ARCY. *Sur la durée de la sensation de la vue. Mém. de l'Acad. des Sc.* 1765. p. 450.
1795. T. CAVALLO. Naturlehre, übers. von TROMMSDORF. III. 132.
1800. A. F. LÜDICKE. Beschreibung eines Schwungrades, die Verwandlung der Regenbogenfarben darzustellen. Gilb. Ann. V. 272.
1810. Derselbe. Versuche über die Mischung prismatischer Farben. Ebenda XXXIV. 4. Beschreibung eines Chromaskops. Ebenda. XXXVI. und LII.
1819. PARROT. *Entretiens sur la Physique.* Dorpat 1819—24. III. 235.
1825. ROGET in *Philosophical Transact.* 1825 I. 131; Pogg. Ann. V. 93. (Radspeichencurven.)
1827. E. G. FISCHER. Lehrbuch der mechanischen Naturlehre. Berlin. II. 267. (Farbenkreisel.)
PARIS. Thaumatrop. Pogg. Ann. X. 480; *Edinb. Journ. of Sc.* VII. 87.
TH. YOUNG. Optische Erscheinung bei einer schwingenden Saite. Pogg. Ann. X. 470—480.
1829. PLATEAU in Pogg. Ann. XX. 304—324; 543. (Verschiedene Dauer des Farbeneindrucks; Radspeichencurven.) *Dissert. sur quelques propriétés des impressions produites par la lumière sur l'organe de vue.* Liège 1829.
1831. FARADAY. *On a peculiar class of optical deceptions. Journ. of the Roy. Inst.* I.; Pogg. Ann. XXII. 601. (Ein Zahnrad durch das andere gesehen; Schraubenbewegung.)
1833. PLATEAU. *Correspond. math. et phys. de l'observat. de Bruxelles.* VII. 365. Pogg. Ann. XXII. 647. (Phänakistoskop.) *Ann. de chim. et de phys.* LIII. 304.
STAMPFER. Die stroboskopischen Scheiben oder optische Zauberscheiben, deren Theorie und wissensch. Anwendung. Wien; Pogg. Ann. XXIX. 189. XXXII. 636. Jahrbuch d. polytechn. Inst. zu Wien. Bd. XVIII.
BUSOLT. Farbenkreisel. Pogg. Ann. XXXII. 656.
1834. HORNER. Dädaleum. Pogg. Ann. XXXII. 650. *Phil. Mag.* (3) IV. 36.
TALBOT. *Phil. Mag.* Nov. 1834. p. 327, und IV. 113. (Rotirende Scheiben zur Photometrie angewendet.)
1835. PLATEAU in: *Bull. de l'Acad. de Bruxelles.* 1835. p. 52. Pogg. Ann. XXXV. 457—464. (Messungen der Lichtstärke intermittirenden Lichts.)
DOVE. Ueber Discontinuität des Leuchtens der Blitze.
ADDAMS. Optische Täuschung bei Betrachtung eines in Bewegung begriffenen Körpers. Pogg. Ann. XXXIV. 384; *Phil. Mag.* V. 373.
1836. PLATEAU. Anorthoskop. *Bull. de l'Acad. de Bruxelles.* III. 7 und 364. Pogg. Ann. XXXVII. 464.
1845. EMSMANN. Optische Täuschung, welche sich an dem Abplattungsmodelle zeigt. Pogg. Ann. LXIV. 326.
DOPPLER in Abhandl. der böhmischen Ges. der Wiss. V. Folge. Bd. 3.

---

[1] *Entretiens sur la Physique.* Dorpat 1819—24. III. 235.
[2] Pogg. Ann. XX. 304—324.
[3] Pogg. Ann. XCI. 611.
[4] Introd. ad philos. natur. §. 1820.
[5] Lehrbuch der mechanischen Naturl. Berlin 1827. II. 267.
[6] Gilbert's Annalen. V. 272 und XXXIV. 4.
[7] Pogg. Ann. XXXII. 656.
[8] *Bull. de Brux.* 1836. III. 7. Derselbe in Pogg. Ann. XX. 319—543. XXXII. 646. XXXVII. 464. LXXVIII. 563. LXXIX. 269. LXXX. 150. 287.

1846. Dove. Ueber die Methoden aus Complementärfarben Weiss darzustellen, und über die Erscheinungen, welche polarisirtes Licht zeigt, dessen Polarisationsebene gedreht wird. Berl. Monatsber. 1846. p. 70. Pogg. Ann. LXXI. 97; *Phil. Mag.* XXX. 465; *Inst.* No. 712. p. 176; *Arch. d. sc. ph. et nat.* V. 276.
Derselbe. Ueber ein optisches Verfahren die Umdrehungsgeschwindigkeit einer rotirenden Scheibe zu messen. Berl. Monatsber. 1847. p. 77. Pogg. Ann. LXXI. 112; *Inst.* No. 712. p. 177.
Müller. Anwendung der strobosk. Scheiben zur Versinnlichung der Wellenlehre. Pogg. Ann. LXVII. 271.

1849. Plateau. *Sur de nouvelles applications curieuses de la persistance des impressions de la rétine. Bull. de Brux.* XVI. I. 424, 588. II. 30, 254. *Inst.* XVII. No. 818. p. 277. No. 830. p. 378. XVIII. No. 835. p. 5. *Phil. Mag.* XXXVI. p. 434, 436; Pogg. Ann. LXXVIII. 563, LXXIX. 269, LXXX. 150, 287; Froriep Notizen X. 221, 325.

1850. J. Tyndall. *Phenomena of water jet.* (Beleuchtung durch elektrische Funken.) *Phil. Mag.* (4) I. 105; Pogg. Ann. LXXXII. 294; *Edinb. Journ.* L. 370; *Inst.* No. 924. p. 303.
H. Buff. Einige Bemerkungen über die Erscheinung der Auflösung des flüssigen Strahls in Tropfen. Liebig und Wöhler LXXVIII. 162. (Beleuchtung durch intermittirendes Licht.)
Billet Sélis. *Sur les moyens d'observer la constitution des veines liquides. Ann. d. chim. et de phys.* (3) XXXI. 326; Pogg. Ann. LXXXIII. 597.
W. Swan. *On the gradual production of luminous impressions on the eye and other phaenomena of vision.* Sillimann J. (2) IX. 443; *Proc. Edinb. Roy. Soc.* 1849. p. 230.
Stevelly. *Attempt to explain the occasional distinct vision of rapidly revolving coloured sectors.* Sillimann J. (2) X. 401; *Rep. of British Assoc.* 1850. 2. p. 21.
Sinsteden. Eine optische Stelle aus den Alten. Pogg. Ann. LXXXIV. 448; *Cosmos* I. 116.

1852. Montigny. *Procédé pour rendre perceptibles et pour compter les vibrations d'une tige élastique. Bull. de Brux.* XIX. 1. p. 227—250; *Inst.* 1852. p. 216—220; 268. Pogg. Ann. LXXXIX. 102—121.

1853. A. Poppe. Das verbesserte Interferenzoskop. Pogg. Ann. LXXXVIII. 223—230. (Beobachtung von Flüssigkeitswellen durch stroboskopische Scheiben.)
F. Uchatius. Apparat zur Darstellung beweglicher Bilder an der Wand. Wiener Ber. X. 482—485.
W. Rollmann. Ueber eine neue Anwendung der stroboskopischen Scheiben. Pogg. Ann. LXXXIX. 246—250.
J. Plateau. *Sur le passage de Lucrèce où l'on a vu une description du fantascope. Arch. d. sc. phys.* XX. 300—302; *Cosmos.* I. 307—309. (Gegen Sinsteden.)

1854. Emsmann. Ueber die Dauer des Lichteindrucks. Pogg. Ann. XCI. 611—618; *Inst.* 1854. p. 276.

1855. Lissajous. *Note sur un moyen nouveau de mettre en évidence le mouvement vibratoire des corps.* C. R. XLI. 93—94; *Inst.* 1855. p. 245. *Cosmos.* VII. 81—83; *Arch. d. sc. phys.* XXX. 159—161.
Derselbe. *Note sur une méthode nouvelle applicable à l'étude des mouvemens vibratoires.* C. R. XLI. 814—817; *Cosmos.* VII. 608—609; *Inst.* 1855. p. 402—403.

1856. Derselbe. *Mémoire sur l'étude optique des mouvements vibratoires.* C. R. XLIII. 973—976; XLIV. 727; XLV. 48—52; *Inst.* 1856. p. 411. 1857. p. 237; *Cosmos.* IX. 626—629; XI. 80—83, 110—112, 431—432; *Ann. d. chim. et de phys.* (3) LI. 147—231.

§. 23. Die Veränderungen der Reizbarkeit.

Wir haben gesehen, dass nach der Einwirkung von Licht auf die Netzhaut der Zustand von Reizung im Sehnervenapparate noch eine Zeit lang anhält. Diese Nachdauer des Eindrucks nimmt man nach der Betrachtung heller Gegenstände am ungestörtesten wahr, wenn man das Auge auf ein ganz dunkles Gesichtsfeld richtet. Ausserdem zeigt sich aber, dass nach Einwirkung hellen Lichts auf irgend eine Stelle der Netzhaut diese nun auch neu von aussen

einfallendes Licht in einer anderen Weise empfindet, als es die vorher nicht afficirten Theile der Netzhaut thun. Wir haben es also hier auch mit einer durch Einwirkung des Lichtes veränderten Empfänglichkeit des Sehnervenapparates gegen äussere Reize zu thun.

Wir wollen im vorliegenden Paragraphen also hauptsächlich aufsuchen, welche Empfindungen entstehen, wenn die von vorausgegangenem hellen Lichte afficirte Parthie der Netzhaut von anderem äusseren Lichte getroffen wird. Ich bemerke jedoch gleich, dass auch ein Theil der Erscheinungen hierhergezogen werden muss, welche im scheinbar dunkeln Gesichtsfelde erscheinen, weil es nämlich in Wirklichkeit kein absolut dunkles Gesichtsfeld giebt, vielmehr auch bei vollständigem Ausschluss alles äusseren Lichtes doch immer noch eine gewisse schwache Reizung der Netzhaut durch innere Einflüsse bestehen bleibt, welche das schon im §. 17 erwähnte Lichtchaos oder Eigenlicht des dunkeln Gesichtsfeldes hervorbringt. Die Reizempfänglichkeit der Netzhaut erscheint nun gegen diese inneren Reize in derselben Weise abgeändert, wie gegen objectives Licht, und es gehören deshalb zu unserem gegenwärtigen Gegenstande auch Erscheinungen, die im dunkeln Gesichtsfelde eintreten, nachdem der Zustand der Reizung der Netzhaut ganz aufgehört hat. Ich bemerke hierbei noch, dass in hellen Räumen der Schluss der Augenlider allein nicht hinreicht, das Gesichtsfeld von allem objectiven Lichte frei zu machen, wie man leicht an der weiteren Verdunkelung merkt, welche eintritt, wenn man die Augen nun zukneift, oder die Hand davor legt. Ja in directer Sonnenbeleuchtung reicht es noch nicht einmal hin auch nur die Hand vorzulegen, weil auch durch diese noch eine wahrnehmbare Quantität rothen Lichtes hindurchdringt. Wenn also im Folgenden von einem ganz dunkeln Gesichtsfelde die Rede ist, so ist darunter immer nur zu verstehen das Gesichtsfeld, wie es in einem absolut dunkeln, von allen Spuren objectiven Lichts geschützten Zimmer sich findet, oder wie es in einem hellen Zimmer entsteht, wenn man die Augen schliesst, und jedes Auge dicht, aber ohne Druck mit einer Handfläche oder einem dunkeln undurchsichtigen Tuche bedeckt.

Ich werde ferner im Folgenden dasjenige Licht, welches zuerst auf die Netzhaut eingewirkt und deren Reizempfänglichkeit verändert hat, das primäre Licht nennen, das später auf die veränderte Netzhautstelle einwirkende dagegen das reagirende Licht, weil es für uns gleichsam ein Reagenz ist, durch welches wir die Reizbarkeit der Netzhaut prüfen.

Die Mannigfaltigkeit der Erscheinungen dieses Gebietes ist nun sehr gross, und obgleich eine ziemliche Anzahl ausgezeichneter Beobachter daran gearbeitet hat, ist es noch in vielen Theilen unsicher und lückenhaft. Die Schwierigkeit liegt darin, dass zuerst jeder Beobachter, der sich daran macht, eine gewisse Zeit braucht, um sich genügend zu üben, die hierher gehörigen Erscheinungen sicher aufzufassen und zu beurtheilen, und dabei meistens diese Versuche schnell die Augen so angreifen, dass wenn man sie zu lange fortsetzt, schwere und gefährliche Augen- und Nervenkrankheiten eintreten. Es haben deshalb die meisten Beobachter bisher nur eine verhältnissmässig geringe Menge von Thatsachen selbst bestätigen und neu entdecken können, und auch jedem künftigen Beob-

achter, welcher dergleichen Versuche machen will, ist anzurathen, an jedem einzelnen Tage nur sehr wenige Versuche dieser Art zu machen, und die Versuchsreihen für längere Zeit abzubrechen, sobald er bemerkt, dass nach den Versuchen oder überhaupt beim Ansehen hellen Lichtes oder lebhafter Farben sich leichte Schmerzen in den Augen oder im Kopfe einstellen, oder wenn die Nachbilder anfangen lebhafter und dauernder zu werden, als sie im gesunden Auge sind.

Wir unterscheiden positive und negative Nachbilder in derselben Weise, wie man bei den Photographien von positiven und negativen Bildern redet. Positive Bilder sind solche, in denen die hellen Parthien des Objects ebenfalls hell, die dunkeln dunkel sind, negative Bilder dagegen solche, in denen die hellen Parthien des Objects dunkler, die dunkeln heller erscheinen.

Ich werde den Gang der Erscheinungen nun zunächst beschreiben, indem ich nur auf die Lichtstärke, nicht auf den Wechsel der Farben Rücksicht nehme, welcher den Wechsel der Helligkeit in den meisten Fällen begleitet, und seine Erklärung wahrscheinlich darin findet, dass für die verschiedenen Farben die Dauer der einzelnen Stadien der Erscheinung verschieden ist. Um den normalen Verlauf der Nachbilder ungestört zu beobachten, ist es nothwendig, zunächst die Netzhaut von den Nachbildern der früheren Lichteindrücke zu befreien, wozu es gewöhnlich nöthig ist und genügt, einige Minuten mit dicht bedeckten Augen zu sitzen, bis man im dunkeln Gesichtsfelde nichts mehr vor sich sieht, als das Lichtchaos, dessen eigenthümliche Figuren (meist gleichsam helle Gerinnsel durch baumartig und netzförmig vertheilte dunkle Streifen getrennt) man bald kennen lernt. Wenn man keine Bruchstücke von Zeichnungen äusserer Gegenstände mehr sieht, und auch beim Eindringen ganz schwachen Lichts durch die geschlossenen Augenlider keine mehr sichtbar werden, ist das Auge vorbereitet, um den Eindruck zu empfangen.

Richtet man nun die Augen eine kurze Zeit auf einen hellen Gegenstand, z. B. die helle Fensterfläche, am besten so, dass man die Richtung der Augen unverändert lässt, und sie nur auf- und zudeckt, so bleibt unmittelbar hinterher ein positives Bild des primären hellen Objects stehen, wie dies schon im vorigen Paragraphen besprochen ist. Dieses Bild ist desto schärfer und deutlicher, je weniger die Richtung der Augen verändert worden ist, und seine Helligkeit finde ich am grössten, wenn die Bestrahlung der Netzhaut durch das primäre Licht etwa nur $^1/_3$ Secunde gedauert hat. Die Erscheinungen des vorigen Paragraphen haben gelehrt, dass die Stärke der Reizung durch das Licht während der ersten Zeitmomente seiner Wirkung zunimmt, aber sie erreicht sehr schnell ihr Maximum. Dauert die Bestrahlung länger als $^1/_3$ Secunde, so nimmt die Stärke des Nachbildes, welche der Intensität der zurückbleibenden Reizung der Sehnervensubstanz entspricht, schnell wieder ab, wovon wir den wahrscheinlichen Grund später nachweisen werden. Je grösser übrigens die Intensität des primären Lichtes ist, desto heller ist das positive Nachbild und desto länger dauert es. Dabei ist zu bemerken, dass im positiven Nachbilde oft auch Grade der Helligkeit unterscheidbar werden, welche beim directen Anblick wegen zu grosser Helligkeit nicht unterschieden wurden. Dreht man

z. B. eine Lampe mit rundem Docht schnell aus, während man nach der erlöschenden Flamme hinblickt, so erkennt man im Nachbilde die grössere Helligkeit der Ränder im Vergleich zur Mitte der Flamme, welche man (siehe §. 21) bei der directen Betrachtnng schwer bemerkt. Dieselbe Bemerkung machte auch Aubert bei den Nachbildern des elektrischen Funkens, welcher direct gesehen als ein verwaschener Lichtstreif, im Nachbilde als eine scharf gezeichnete Linie erschien. Man kann übrigens auch von sehr mässig erleuchteten Gegenständen, z. B. von weissem Papier, welches die zum Schreiben und Lesen bequeme Helligkeit hat, nach der beschriebenen Methode noch positive Nachbilder gewinnen, die eine erkennbare Dauer von etwa zwei Secunden haben, während im Gegentheil das helle Nachbild der Sonne oft mehrere Minuten lang stehen bleibt.

Um die positiven Nachbilder recht schön zu haben, beachte man noch folgende Regeln. Während ihrer Erzeugung und ihrer Dauer muss man sorgfältig jede Bewegung des Auges und jede heftigere Bewegung des Körpers vermeiden, weil sie bei einer solchen stets für einige Zeit verschwinden. Nachdem man also genügende Zeit mit dicht bedeckten Augen gesessen hat, richte man unter den bedeckenden Händen die Augen nach der Richtung des Objects und bemühe sich, sie ganz unverrückt zu halten, während man die Hände schnell wegzieht, und ebenso schnell wieder überdeckt. Diese Bewegung der Hände muss aber leise und leicht, ohne starke Anstrengung und Erschütterung des Körpers ausgeführt werden. Wenn man dies Verfahren gut eingeübt hat, so gelingt es zuweilen, das positive Nachbild unter den bedeckenden Händen so scharf und hell zu sehen, dass es den Eindruck macht, als wären die Hände durchsichtig, und man sähe die wirklichen Objecte. Man hat Zeit genug, an diesen Nachbildern noch eine Menge einzelner Umstände zu bemerken, auf welche zu achten man während der wirklichen Betrachtung nicht Zeit hatte. Die lichtschwachen Flächen verschwinden am schnellsten, ohne ihre Farbe wesentlich zu verändern, die helleren bleiben längere Zeit stehen, wobei ihre Farbe durch bläuliche Töne in ein violettes Rosa, später Gelbroth übergeht. Zur Zeit, wo die helleren Stellen aus Blau in Violett übergehen, wird die Zeichnung des Nachbildes oft ziemlich undeutlich, weil, wie mir scheint, die hellen Theile dann verhältnissmässig mehr an Licht verloren haben als die schwächer beleuchteten, und beide in ihrer Beleuchtung sich ziemlich nahe gekommen sind, und weil wir überhaupt, wie im folgenden Paragraphen noch näher zu besprechen ist, nur wechselnde Erregungszustände der Netzhaut gut von einander unterscheiden, für einen constanten Erregungszustand aber schnell das Unterscheidungsvermögen verlieren. Später werden in den positiven Nachbildern die weniger hellen Gegenstände ganz dunkel und die helleren bleiben noch längere Zeit, jetzt rosa gefärbt, allein sichtbar. Sehr auffallend war es, wenn ich das Nachbild eines hellen Teppichs betrachtete, über welchen vom Fenster her ein Streifen Sonnenlicht fiel. Es trat eine Zeit ein, wo ich das Muster des Teppichs vollständig sah, aber überall gleich hell, so dass der Streifen Sonnenlicht sich nicht mehr bemerklich machte. Nachher verschwand das Muster des Teppichs, während die Figur des genannten helleren Streifen

nun wieder in rosarothem Lichte erschien, und bis zuletzt stehen blieb. Es kann daher auch wohl bei bestimmten Beleuchtungsgraden die Zeichnung des Bildes ganz oder theilweis sehr undeutlich werden, und nachher wieder deutlicher, also scheinbar das Bild fast verschwinden und nachher sich wieder aufklären. Wenn man aber genau aufpasst, wird man bemerken, dass der Grund des Bildes zur Zeit der Verwirrung der Zeichnung merklich heller ist, als wenn nachher die hellsten Stellen auf ganz schwarzem Grunde abgezeichnet wieder erscheinen. Es ist deshalb in solchen Fällen nicht der Lichteindruck verschwunden und wieder gekommen, sondern nur der Unterschied zwischen hellen und helleren Stellen für einige Zeit kleiner geworden, und die Fähigkeit ihn wahrzunehmen verschwunden, bis neuer Wechsel in Färbung und Helligkeit des Nachbildes diese wieder herstellen. Uebrigens habe ich stets an Bildern, welche viele verschieden helle Objecte enthielten, gesehen, dass die einzelnen Objecte desto später aus dem positiven Bilde gänzlich verschwanden, je heller sie waren. Bei schwachen Nachbildern, wie diejenigen wohl waren, welche AUBERT nach der Beleuchtung der Objecte durch den elektrischen Funken erhielt, hat dieser Beobachter jedoch gefunden, dass nach schwachen Funken die positiven Nachbilder länger dauerten, als nach starken Funken.

Hat man dagegen beim Auf- und Zudecken des Auges dieses kräftig bewegt, oder gedrückt, oder erschüttert, so sieht man im ersten Moment ein verwirrtes Lichtchaos, aus dem sich dann erst allmälig das Nachbild entwickelt. Ebenso wird das schon entwickelte Nachbild durch Bewegung, Erschütterung, Druck, äusseres Licht zeitweise oder ganz aufgehoben.

Wenn das äussere Licht nur sehr kurze Zeit eingewirkt hatte, nicht blendend war, und das Gesichtsfeld ganz frei von allen Spuren äusseren Lichts gehalten wird, verschwindet das positive Bild gewöhnlich, ohne in ein negatives überzugehen. Wenn man aber, während das positive Nachbild noch besteht, oder auch etwas später, das Auge gegen gleichmässig beleuchtete Flächen kehrt, oder auch nur mit geschlossenen Lidern sich nach einer hellen Umgebung wendet, erscheint ein negatives Nachbild. Je stärker das positive Nachbild ist, desto stärker muss auch das reagirende Licht gemacht werden, um es in ein negatives Bild zu verwandeln. Es giebt immer eine gewisse Stärke des reagirenden Lichts, bei welcher das positive Bild einfach verschwindet, ohne negativ zu werden. Ist das reagirende Licht stärker, so entsteht ein negatives Bild, ist es schwächer, so bleibt das Bild positiv und wird nur undeutlicher. Mit wachsender Stärke des reagirenden Lichts wächst übrigens auch die Deutlichkeit des Nachbildes, bis jene Lichtstärke den Grad überschreitet, der für Erkennung von Differenzen der Lichtstärke um kleine Bruchtheile am günstigsten ist, um dann wieder abzunehmen. Man kann somit auch Nachbilder erhalten von schwächerem primitiven Lichte auf stärkerem reagirenden, nur muss man auf sie gut aufpassen, weil sie sehr schnell vergehen. Auch nachdem das positive Bild geschwunden ist, bleibt auf hellen Flächen das negative Nachbild noch kurze Zeit sichtbar, indem es ebenfalls allmälig erblasst und verschwindet, ja es kann sogar im ganz dunkeln Gesichtsfelde sichtbar werden, indem es hier als eine Verminderung der Helligkeit des Eigenlichts der Netzhaut erscheint. In der Regel erscheint dann

dieses Eigenlicht selbst in der nächsten Umgebung des dunklen Nachbildes durch Contrast mit diesem etwas heller.

Grössere Intensität des primären Lichts giebt dem negativen Nachbilde eine grössere Deutlichkeit und Dauer. Auch unterscheiden sich im Nachbilde diejenigen Theile eines als primär beleuchtendes Object gebrauchten, blendend hellen Gegenstandes, welche eine objectiv verschiedene, für die Empfindung aber nicht verschiedene Lichtstärke haben. Ich habe oft gesehen, wenn ich nach der untergehenden Sonne geblickt hatte, dass Gegenstände, die einen Theil der Sonnenscheibe bedeckten, im negativen Nachbilde deutlich zu erkennen waren, von denen beim directen Anblick der Sonne wegen der Irradiation keine Spur zu erkennen war. Selbst kleine Gegenstände, Zweige und Blätter von Bäumen können auf diese Weise nachträglich sichtbar werden. Die Reizempfänglichkeit derjenigen Netzhauttheile, welche das Bild der Sonnenscheibe selbst aufgenommen haben, ist also nachher stärker verändert, als sie es in den Netzhautstellen ist, welche von den Zerstreuungskreisen und dem diffus verbreiteten Lichte getroffen waren, obgleich die ursprüngliche Empfindung beider sich nicht unterscheiden liess. Eben deshalb sind Nachbilder der Sonne anfangs gewöhnlich grösser als die Sonnenscheibe, und werden später kleiner, indem sich anfangs noch ein Nachbild der Zerstreuungskreise am äusseren Rande der Sonne hinzugesellt, welches aber schneller negativ wird und endlich früher schwindet als das der Mitte des Sonnenkörpers, wo die volle Helligkeit desselben eingewirkt hat.

Der Einfluss der Dauer der primären Bestrahlung ist für das negative Nachbild ein anderer als für das positive. Nämlich die Stärke des negativen Nachbildes nimmt zu mit der Dauer der Bestrahlung, und scheint sich erst bei längerer Dauer asymptotisch einem gewissen Maximum zu nähern. Durch lange Dauer sehr starker Bestrahlung kann sogar eine bleibende Veränderung der betreffenden Netzhautstelle entstehen, wie dies Ritter[1] erfuhr, als er 10 bis 20 Minuten lang direct in die Sonne gesehen hatte. Zur Erzeugung deutlicher negativer Nachbilder ist es deshalb nützlich, die primäre Bestrahlung länger (bei mässigem Licht etwa 5—10 Secunden) dauern zu lassen. Dann ist das positive Nachbild schwach und schwindet schnell, das negative dagegen stärker und dauert länger. So z. B. schwindet nach der Betrachtung heller Wolken durch das Fenster von $1/3$ Secunde Dauer das positive Nachbild nach etwa 12 Secunden, das negative auf hellerem Grunde nach etwa 24 Secunden. Wenn ich dasselbe Object dagegen 4 oder 8 Secunden betrachtete, schwand das negative Nachbild erst nach 8 Minuten. Ich hielt das Gesichtsfeld dabei ganz dunkel und liess nur von Zeit zu Zeit schwaches Licht durch die geschlossenen Lider einfallen, um zu prüfen, ob das Nachbild noch da sei. Um das negative Nachbild recht scharf gezeichnet zu erhalten, ist es nothwendig, während der Dauer der Bestrahlung scharf einen bestimmten Punkt des hellen Objects zu fixiren. In dem negativen Nachbilde ist es noch besser als in dem flüchtigeren positiven möglich nachträglich Einzelheiten zu erkennen, die man bei der directen Beschauung nicht bemerkt hat. Hat man nach einander zwei verschiedene Punkte des

[1] Beiträge zur näheren Kenntniss des Galvanismus. 1805. Bd. II. S. 175—181.

Objects fixirt, so erkennt man auch nachher zwei sich theilweis deckende Nachbilder. So kann man auch im Nachbilde, wenn im Gesichtsfelde die Sonne steht, und man den Blick schnell über das Feld hinschweifen liess, den ganzen Weg abgebildet erhalten, den das Sonnenbildchen auf der Netzhaut zurückgelegt hat. Hat man den Blick auf einzelnen Stellen des Feldes einen Augenblick festgehalten, so entsprechen diesen Punkten intensivere runde Nachbilder der Sonne, welche länger positiv bleiben, und wenn sie negativ geworden sind, dunkler werden und länger dauern. Diese sind verbunden durch schmalere verwaschene Streifen, welche anfangs zwar auch hell sind, sich aber bald negativ dunkler zeigen, und desto schwächer gezeichnet sind, je grösser die Geschwindigkeit der Augenbewegung für die betreffende Stelle gewesen war. Diese Streifen sind schmaler als die Sonnenscheibe und am Rande verwaschen, weil über die ihrem Rande entsprechenden Netzhauttheile nur eine Sehne des runden Sonnenbildes hingeglitten ist, über die mittleren dagegen ein Durchmesser; auf letztere also das Sonnenlicht länger gewirkt hat.

Positive wie negative Nachbilder bewegen sich, wenn das Auge bewegt wird. Ihre scheinbare Lage im Gesichtsfelde entspricht immer dem Orte, wo ein Object sich befinden müsste, dessen Bild auf die von dem primären Lichte getroffene Netzhautstelle fallen sollte. Ist also der gelbe Fleck von starkem Lichte getroffen worden, so befindet sich das Nachbild, wo man auch hinsehen möge, immer im Fixationspunkte des Auges und hindert, wenn es stark ist, feinere Gegenstände zu erkennen. Liegt ein kräftig gezeichnetes Nachbild dicht neben dem Fixationspunkte, so verleitet es den Beschauer leicht, es fixiren zu wollen, das Auge wendet sich nach dem Nachbilde hin, und dann fliegt dieses scheinbar immer vor dem Fixationspunkte her nach dem Rande des Gesichtsfeldes hin, ähnlich den fliegenden Mücken. Fixirt der Beschauer aber einen äusseren festen Punkt, so stehen auch die Nachbilder still. Ihre Bewegung hängt immer nur von Bewegung des Auges ab.

Wenn wir nun aus den bisher beschriebenen Erscheinungen Schlüsse auf den Zustand der Netzhautstelle und des zugehörigen Theils des Sehnervenapparats ziehen, welche von dem primären Lichte erregt worden waren, so finden wir, dass in ihnen erstens nach Erlöschen des primären Lichtes der Reizungszustand noch eine Zeit lang dauert, was durch die positiven Nachbilder angezeigt wird, und dass zweitens die betreffende Nervensubstanz neu einfallendes, reagirendes Licht schwächer empfindet, als die früher von Licht nicht getroffenen übrigen Netzhautstellen. *Nach der Einwirkung von Licht besteht also erstens Reizung fort, zweitens ist die Empfänglichkeit für neue Reize vermindert.* Dass Reizung einen Zustand verminderter Reizempfänglichkeit zurücklässt, findet auch bei den motorischen und anderen empfindenden Nerven statt. Wir nennen einen solchen Zustand *Ermüdung*.

Aus dem Umstande, dass die negativen Nachbilder bei steigender Helligkeit des reagirenden Lichts so lange deutlicher werden, bis diese Helligkeit etwa den Grad erreicht hat, wo Verminderung der Lichtstärke um kleine Bruchtheile ihrer ganzen Grösse am besten wahrgenommen wird, können wir schliessen, dass die Ermüdung der Sehnervensubstanz die Empfindung neu einfallenden

Lichtes ungefähr in dem Verhältniss beeinträchtigt, als wäre die objective Intensität dieses Lichtes um einen bestimmten Bruchtheil ihrer Grösse vermindert. Es soll, bei dem Mangel genügender Messungen, hierdurch nur der Gang im Allgemeinen bezeichnet werden, welchen die Intensität der Empfindung einer ermüdeten Netzhautstelle als Function der Intensität des reagirenden Lichtes einhält. So lange noch neben dem negativen Bilde das positive besteht, ist die Reizung der Netzhaut zusammengesetzt aus der noch fortbestehenden Reizung, welche das primäre Licht hervorgebracht hat, und der durch die Ermüdung verminderten Reizung durch das reagirende Licht, und in diesem Sinne können wir die Helligkeit des Nachbildes als die Summe der Helligkeit des positiven Bildes und der durch die Ermüdung verminderten Helligkeit des reagirenden Lichtes betrachten. Ist nun die Verminderung der Helligkeit des reagirenden Lichts grösser als die Helligkeit des positiven Bildes, so wird die ganze Helligkeit des Nachbildes geringer sein, als die Helligkeit des reagirenden Lichts, wie sie den nicht ermüdeten Netzhautstellen erscheint, das Nachbild also negativ werden. Dies ist bei grösserer Helligkeit des reagirenden Lichtes der Fall. Bei geringerer dagegen ist die Helligkeit des positiven Bildes mehr als hinreichend, den Verlust durch die Ermüdung zu decken, das Bild ist positiv.

Es sei H die scheinbare Helligkeit des reagirenden Lichts in den nicht ermüdeten Netzhautstellen, αH in den ermüdeten, wo $\alpha < 1$, und I die scheinbare Helligkeit des positiven Bildes, so muss nach dem oben Gesagten bei wechselnder Grösse von $H\alpha$ ziemlich constant sein. Nehmen wir dies an, so ist $\alpha H + I$ die Helligkeit des Nachbildes, H die des Grundes, auf welchem es erscheint. Für

$$H = \frac{I}{1-\alpha}$$

wird

$$I + \alpha H = H$$

das Nachbild so hell, wie der Grund, es wird unsichtbar. Für

$$H > \frac{I}{1-\alpha}$$

wird

$$I + \alpha H < H$$

das Nachbild negativ, umgekehrt für

$$H < \frac{I}{1-\alpha}$$

wird das Nachbild positiv. Ist I sehr klein, so kann schon die scheinbare Helligkeit des Eigenlichts der Netzhaut grösser sein als $\frac{I}{1-\alpha}$, dann wird das negative Bild auch im dunkelsten Gesichtsfelde erscheinen. Ist endlich das positive Bild ganz geschwunden, so ist H die Helligkeit im Grunde und αH im Nachbilde. Ist $1-\alpha$ bei schwindender Ermüdung sehr klein geworden, so wird eine gewisse mittlere Stärke des reagirenden Lichts nöthig sein, um den Unterschied erkennen zu lassen. Im dunkeln Gesichtsfelde wird es dann nicht zu sehen sein. Endlich wird $1-\alpha = 0$ und das Nachbild schwindet ganz.

Was die negativen Bilder im ganz verdunkelten Gesichtsfelde betrifft, so lehrt der Augenschein, dass sie durch Verringerung des Eigenlichts der Netzhaut

zu Stande kommen. Dieses Eigenlicht also, welches wir aus der Wirkung innerer Reize auf den Sehnervenapparat herleiten müssen, unterliegt den Wirkungen der Ermüdung ebenso wie der Eindruck des äusseren Lichts. Dass Ermüdung des Auges durch Reizung seine Empfänglichkeit für andere Reize beeinträchtigt, lässt sich übrigens auch für elektrische und mechanische Reize der Netzhaut nachweisen. Wenn man ein negatives Nachbild im Auge entwickelt hat, und lässt einen elektrischen Strom aufsteigend durch Auge und Sehnerven gehen, wobei die helle bläuliche Erleuchtung des Gesichtsfeldes eintritt, so wird das negative Nachbild dadurch verstärkt, und wenn ein Bild gerade im Uebergang von positiv zu negativ ist, kann man es durch einen aufsteigenden Strom negativ, durch einen absteigenden positiv machen. Das für Licht ermüdete Auge empfindet also auch den elektrischen Reiz schwächer. Hat man durch gleichmässig anhaltenden Druck Farbenerscheinungen im Auge entwickelt, und lässt mit dem Drucke nach, so kann man die noch bestehenden Bilder im dunkeln Gesichtsfelde negativ machen, indem man Licht durch die geschlossenen Augenlider einfallen lässt, oder nach einer beleuchteten Fläche hinblickt. Die Ermüdung durch Druckreiz macht also das Auge auch gegen Lichtreiz unempfindlicher.

In solchen Fällen, wo man ein schwindendes Nachbild durch reagirendes Licht für einen Augenblick sichtbar gemacht hat, sieht man zuweilen unmittelbar nachher im dunkeln Gesichtsfelde wieder ein schwaches positives Nachbild. Daraus ist zu schliessen, dass in der ermüdeten Netzhautstelle die Reizung durch reagirendes Licht zwar schwächer ist als in den nicht ermüdeten Theilen, aber länger nachdauert, welcher Umstand übrigens ebenfalls bei den motorischen Nerven seine Analogie findet, da die Zuckung eines ermüdeten Muskels zwar weniger kräftig ist, aber länger dauert, als die eines nicht ermüdeten. Dieser Wechsel zwischen positiven und negativen Bildern, welcher zuweilen bei wenig auffallenden Aenderungen der Beleuchtung durch Zukneifen der Augenlider, Bewegungen des Augapfels unter den geschlossenen Lidern, auch wohl nach subjectiven Lichterscheinungen durch plötzlichen Druck auf den Augapfel eintreten kann, hat einige Beobachter, namentlich Plateau, veranlasst, einen spontanen Wechsel der Zustände des Nervenapparats während der Dauer der Nachwirkung anzunehmen. Ich selbst kann in dieser Beziehung nur Fechner beistimmen, dass in den meisten Fällen Wechsel der Beleuchtung, Bewegungen des Auges oder des Körpers u. s. w. Veranlassung zu diesem Wechsel geben. Aber natürlich kann zu einer Zeit, wo sich zwei entgegengesetzte Einflüsse gerade im Gleichgewichte halten, der kleinste Nebenumstand nach der einen oder anderen Seite einen Ausschlag geben. Ich erinnere daran, dass selbst die Athembewegungen auf das Eigenlicht der Netzhaut einwirken. Zuweilen schwinden auch die Bilder nur, ohne sich in die entgegengesetzten zu verwandeln, und zwar, wie Aubert es passend bezeichnet, so als wenn eine nasse Stelle auf einem erwärmten Bleche schwindet. Uebrigens verschwinden auch schwache objective Bilder zuweilen in ähnlicher Weise, wenn man starr einen Punkt fixirt, z. B. eine Landschaft in der Nacht betrachtet. Es macht mir den Eindruck, als ob die Vergleichung der Erregungsstärke verschiedener Netzhauttheile auf-

hörte möglich zu sein, wenn die Erregung nicht von Zeit zu Zeit wechselt. Bei objectiven Bildern ist dies jederzeit zu bewerkstelligen, dadurch dass man den Fixationspunkt wechselt, bei subjectiven aber nicht. Wir kommen in der Lehre vom Contraste darauf noch wieder zurück. Ich finde übrigens, dass wenn man bei möglichst unverrückt gehaltenem Auge dergleichen Bilder aufmerksam festzuhalten sucht, das Gefühl der Anstrengung gerade dann am grössten ist, wenn die Bilder so hinschwinden. Dann folgt nach einiger Zeit ein Nachlass dieser Anstrengung, wobei die Bilder wiederkommen. Welche innere Veränderung dem entspricht, weiss ich nicht anzugeben.

Hierher gehören weiter folgende Erscheinungen, die sich aus den angegebenen Principien erklären.

Wenn man auf grauem Grunde einen hellen Gegenstand, z. B. ein weisses Stück Papier, betrachtet, und dieses plötzlich entfernt, während man die Richtung des Auges unverändert lässt, so erscheint ein dunkleres Nachbild des weissen Papiers, wie in den bisher beschriebenen Fällen. Betrachtet man auf dem grauen Grunde dagegen ein Stückchen schwarzen Papiers, und zieht dies weg, so erscheint ein helles Nachbild. Die von dem Bilde des weissen Papiers getroffene Stelle der Netzhaut ist mehr ermüdet, die von dem schwarzen Bilde getroffene weniger ermüdet, als der Rest der Netzhaut, auf welchem der graue Grund sich abbildete. Indem nachher die ganze Netzhaut gleichmässig von dem Lichte des grauen Grundes getroffen wird, wirkt dieses Licht am stärksten auf den Theil der Netzhaut, der primär schwarz sah, schwächer auf den, der vorher grau sah, am schwächsten auf den, der weiss sah. Der Versuch, bei dem wir das schwarze Papier betrachten und dann wegziehen, ist nun deshalb wichtig, weil er zeigt, dass bei längerer Betrachtung des grauen Grundes Ermüdung der von seinem Lichte getroffenen Netzhaut eintritt, und dieses Licht deshalb immer schwächer und schwächer empfunden wird. Wenn wir nämlich das schwarze Papier wegziehen, trifft das Licht des grauen Grundes eine nicht ermüdete Stelle der Netzhaut, und macht auf diese eben denselben Eindruck, den zu Anfang des Versuchs das Grau des Grundes gemacht hat. Dieses hat aber inzwischen die Theile der Netzhaut, die es trifft, ermüdet, und erscheint viel dunkler, wenn wir es mit dem frischen Eindrucke auf den unermüdeten Netzhautstellen vergleichen. Es unterscheidet sich dieser Versuch von den früheren dadurch, dass das primäre und das reagirende Licht dasselbe ist, nämlich das Licht des grauen Grundes. Wir erkennen daraus, dass *äusseres Licht von constanter Stärke, welches längere Zeit ununterbrochen auf die Netzhaut einwirkt, eine immer schwächer und schwächer werdende Erregung derselben hervorbringt.* Ja die Erregungsstärke kann, namentlich bei sehr schwachem Lichte, so abnehmen, dass sie überhaupt nicht mehr wahrgenommen wird. Wenn man bei hereinsinkender Nacht irgend einen schwach erkennbaren Gegenstand anhaltend fixirt, ohne die Richtung des Auges zu verändern, verschwindet derselbe bald vollständig, und erst indem man die Richtung des Blicks verändert, pflegt das Object wieder im negativen Nachbilde aufzutauchen. Namentlich am Seehorizonte ist diese Erscheinung sehr auffallend, wenn man bei beginnender Dunkelheit sich bestrebt

ihn zu durchmustern, weil hier die Nachbilder jedes Theiles des Horizonts jedem anderen Theile congruent sind, und welche Stelle man auch fixiren mag, das Nachbild des dunkleren Meeres auf Meer, des helleren Himmels auf Himmel fällt. Richtet man den Blick dann etwas höher, so erscheint am unteren Theile des Himmels ein hellerer Streif, der unten begrenzt ist durch die jetzt wieder sichtbar werdende Grenze des Meeres, oben durch eine dieser parallel fortlaufende Linie, die durch den neuen Fixationspunkt geht. Dieser Streif ist das negative Nachbild des Meeres, auf den Himmel projicirt. Richtet man den Blick umgekehrt tiefer, so erscheint ein schwarzer Streif, das negative Nachbild des Himmels auf dem Meere, nach oben begrenzt durch den Horizont des Meeres, nach unten durch eine damit parallele Linie. So kann der Horizont im indirecten Sehen sichtbar werden, aber er verschwindet immer wieder, wenn man ihn direct zu fixiren sucht.

Aehnliche Erscheinungen treten auch ein, wenn man ein weisses oder schwarzes Quadrat auf grauem Grunde fixirt, und den Fixationspunkt ein wenig verändert. Dann deckt das Nachbild des Papiers nicht vollständig das Papier selbst und die Ränder verändern ihre Helligkeit. Wo das Nachbild des weissen Papiers auf den grauen Grund zu liegen kommt, erscheint dieser dunkler; wo das Nachbild des grauen Grundes sich über das weisse Papier hinschiebt, erscheint dieses heller. Beim schwarzen Papier ist es umgekehrt. Hat man den Blick eine Zeit lang genau an einem bestimmten Punkte des Papiers festgehalten und richtet ihn plötzlich auf einen anderen benachbarten Punkt, so sind auch die Ränder des Nachbildes scharf gezeichnet, und der wahre Sachverhalt ist leicht zu erkennen. Wenn man dagegen fortdauernd mit dem Fixationspunkte geschwankt hat, so sind die Nachbilder schlecht begrenzt, und es erscheint dann der helle Grund in der Nähe des weissen Papiers nur verwaschen dunkler schattirt, und der Rand des weissen Papiers ebenso hell schattirt. Aehnliches geschieht, wenn man eine Zeit lang ein weisses Quadrat auf dunklem Grunde betrachtet hat und, ohne den Fixationspunkt zu verändern, das Auge plötzlich dem Object näher bringt, so dass die scheinbare Grösse des letzteren wächst. Dann erscheint der Rand des Quadrats, soweit er jetzt nicht mehr von dem Nachbilde des früher gesehenen Bildes gedeckt wird, hell aufzublitzen. Entfernt man dagegen das Auge plötzlich, nachdem man das Quadrat längere Zeit fixirt hat, so erscheint es auf dem dunkeln Grunde von einem dunkleren Rahmen umgeben.

Für die Seitentheile der Netzhaut haben Purkinje und Aubert bemerkt, dass der Eindruck heller Objecte auf ihnen viel leichter schwindet, als im Centrum. Die Ermüdung scheint dort also viel schneller einzutreten. Für die negativen Nachbilder auf den Seitentheilen hat Aubert gefunden, dass sie weniger intensiv sind, als die centralen, übrigens sich im Wesentlichen ähnlich verhalten. Ausserdem, finde ich, werden sie viel leichter übersehen als die centralen Nachbilder, selbst auf hellen Flächen, und nur beim Wechsel der Beleuchtungsstärke bemerkt man sie leicht.

Wir gehen jetzt über zu den Farbenerscheinungen der Nachbilder. Wenn man farbige Objecte betrachtet hat, und die Nachbilder auf ganz dunklem oder weissem Grunde von verschiedener Helligkeit betrachtet, so entsteht je nach

Umständen ein positives oder negatives Bild. Das positive Bild ist im Anfang in den Stadien seiner grössten Helligkeit gleich gefärbt mit dem Object, und das negative Bild ist, wenigstens sobald es vollständig und kräftig entwickelt ist, complementär zu dem Objecte gefärbt. Der Uebergang von dem positiven zu dem negativen Bilde geschieht indessen gewöhnlich so, dass sich weissliche oder graue Farbentöne anderer Art dazwischenschieben, und zwar ist die Ordnung dieser Farben in der Regel dieselbe, gleichviel ob der Uebergang durch allmäliges Nachlassen der Reizung oder durch Steigerung der Helligkeit des Grundes geschieht.

Die positiven Bilder entwickelt man am besten durch momentane Wirkung des primären Lichtes. Hat man dabei verschieden gefärbte Objecte vor sich, so zeigt das zurückbleibende positive Nachbild im Anfange die Objecte genau in ihren natürlichen Farben. Ehe das Nachbild verschwindet, ergiesst sich darüber meistens ein rosenrother Schein, in welchem die früheren Farbenunterschiede fast ganz verschwinden, dann folgen schwach gefärbte gelblich-graue Töne, in denen das positive Bild schwindet, oder in ein schwach gezeichnetes negatives Nachbild übergeht.

Die negativen Nachbilder erhält man besser nach längerer Fixation des Objects. Um sie zu sehen, lege man farbige Papiere auf einen grauen Grund, fixire einen bestimmten Punkt des farbigen Papiers und ziehe es plötzlich weg. Dann erscheint auf dem grauen Grunde ein scharf gezeichnetes negatives Nachbild von complementärer Färbung. So ist z. B. das Nachbild von Roth blaugrün, von Gelb blau, von Grün rosaroth, und umgekehrt. Ueber die Dauer und Stärke dieser Nachbilder gilt im Allgemeinen dasselbe, was vorher über die Nachbilder weisser Objecte gesagt worden ist.

Das Auge also, welches z. B. Gelb gesehen hat, befindet sich nachher in einem Zustande, wo die blauen Theile des weissen Lichts es stärker afficiren, als die gelben Theile. Die Ermüdung der Netzhaut erstreckt ihre Wirkung demnach nicht gleichmässig auf jede Art von Reizung, sondern hauptsächlich auf eine solche Reizung, welche der primären ähnlich ist. Sehr einfach wird dieser Umstand aus Th. Young's Annahme dreier für die verschiedenen Farben verschieden empfindlichen Nervenarten erklärt. Denn da das farbige Licht diese drei Arten von Nerven nicht gleich stark erregt, so müssen den verschiedenen Graden der Erregung auch verschiedene Grade der Ermüdung nachfolgen. Hat das Auge Roth gesehen, so sind die rothempfindenden Nerven stark gereizt und sehr ermüdet, die grünempfindenden und violettempfindenden schwach gereizt und wenig ermüdet. Fällt nachher weisses Licht in das Auge, so werden die grün- und violettempfindenden Nerven davon verhältnissmässig stärker afficirt werden, als die rothempfindenden. Der Eindruck des Blaugrün, der Complementärfarbe des Roth, wird deshalb in der Empfindung überwiegen.

Entsprechend verhält es sich, wenn man negative Nachbilder von farbigen Objecten auf farbigem Grunde betrachtet. Aus der Farbe des Grundes schwinden immer hauptsächlich diejenigen Bestandtheile, welche in der primär angeschauten Farbe überwiegen. So lässt ein grünes Object auf gelbem Grunde ein rothgelbes Nachbild, auf blauem Grunde ein violettes. Denken wir uns das Gelb aus Roth

und Grün, das Blau aus Grün und Violett zusammengesetzt, dann das Grün in beiden durch Einfluss der Ermüdung vermindert, so ergiebt sich der Erfolg, dass das Nachbild im Gelb sich dem Roth, im Blau dem Violett nähern wird. Ueberhaupt liegt die Farbe des Nachbildes immer zwischen der des Grundes und der der Complementärfarbe des Objects, und kann, soweit es nur den Farbenton, nicht die Helligkeit betrifft, als eine Mischung von beiden angesehen werden.

Von besonderem Interesse sind die Fälle, wo die Farbe des Objects der des Grundes gleich oder complementär ist. Um Beobachtungen über den ersteren Fall zu machen, thut man am besten, ein schwarzes Object auf einen farbigen Grund zu legen, und nachdem man einen Punkt seines Randes eine Weile fixirt hat, es plötzlich hinwegzuziehen. Unter diesen Umständen ist der neben dem Schwarz sichtbare Theil des Grundes als das primäre farbige Object zu betrachten, der ganze farbige Grund nach Entfernung des schwarzen Objects als das reagirende Licht. Man sieht alsdann ein helles Nachbild des schwarzen Objects, in welchem die Farbe des Grundes nicht blos lichtstärker, sondern auch gesättigter ist, als im Rest des Grundes, so dass sie auf dem letzteren mit vielem Grau gemischt zu sein scheint. Bei einiger Aufmerksamkeit erkennt man das Dunkel- und Grauwerden des farbigen Grundes auch wohl, ehe man das schwarze Object wegnimmt. Recht auffallend wird es im letzteren Momente, weil nun an dieser Stelle die Farbe in der Weise sichtbar wird, wie sie im ersten Augenblicke des Beschauens das unermüdete Auge afficirt. Dieses Grauwerden des Grundes findet sich nicht blos bei gemischten weisslichen Farben, bei welchen es so stark werden kann, dass der Farbenton des Grundes ganz verschwindet, sondern selbst bei den homogenen Farben des Spectrum und gewisser farbiger Gläser, nachdem man auf das sorgfältigste alles fremde weisse Licht ausgeschlossen hat. Wenn man z. B. ein mit Kupferoxydul roth gefärbtes Glas, welches nur rothe Strahlen hindurchlässt, vor die Augen nimmt, den Kopf und die Ränder des Glases mit einem dunkeln Tuche umhüllt, so dass nur rothes Licht zu den Augen dringen kann, dann durch das Glas nach einer weissen Fläche sieht, und vor diese ein schwarzes Object bringt, welches man plötzlich entfernt, so sieht man den Gegensatz zwischen dem rothgrauen Grunde und dem gesättigten Roth des Nachbildes ganz deutlich. Die Erklärung dieser Erscheinung liegt offenbar darin, dass während des Anschauens der rothen Farbe des Grundes die betreffenden Theile der Netzhaut für Roth ermüden, und es deshalb schwächer empfinden, als die unermüdeten Theile, auf welche das Bild des schwarzen Objects gefallen war. Ist das Roth auch noch mit Weiss gemischt, so nimmt die Empfindlichkeit für das Roth in einem stärkeren Verhältnisse ab, als für die übrigen Farben, die in dem beigemischten Weiss enthalten sind, und die Farbe muss deshalb durch die Ermüdung der Netzhaut verhältnissmässig weisslicher werden; da sie aber auch gleichzeitig lichtschwächer wird, erscheint sie grau. Dasselbe geschieht nun aber nicht blos mit weisslichem Roth, sondern auch mit ganz reinem Roth, und hier wird die Erklärung zweifelhafter. Man könnte erstens an den Lichtnebel des dunkeln Gesichtsfeldes denken. Wenn man während der Zeit, wo das Nachbild im Auge entwickelt ist, das Auge schliesst und vollständig verdunkelt, so sieht man in dem Lichtnebel ein

deutlich gezeichnetes complementär gefärbtes Nachbild des Grundes, in unserem Falle blaugrün. Die inneren Reize, welche die Empfindung des Lichtnebels bewirken, bringen in der für Roth ermüdeten Stelle der Netzhaut, ebenso wie weisses objectives Licht, nur die Empfindung des Blaugrün hervor. Wird diese Empfindung nun zusammengesetzt mit der von objectivem Roth, so muss daraus ein weissliches (oder graues) Roth hervorgehen, wie es in dem Versuche beobachtet wird.

Indessen scheint mir diese Erklärung nicht zu genügen, da die scheinbare Lichtintensität des Lichtnebels vor geschlossenen Augen doch nur sehr gering erscheint. Es ist allerdings schwer, ein bestimmtes Maass dafür anzugeben. Das Grauwerden des Roth kann aber auch an sehr hellem rein rothen Lichte beobachtet werden, z. B. an weiss von der Sonne beleuchteten Wolken, die man durch ein rothes Glas betrachtet. In diesem Falle würde Th. Young's Hypothese die Erklärung geben. Ich habe oben schon auseinandergesetzt, dass wir dabei die Annahme machen müssten, dass die Spectralfarben stark zwar nur eine oder zwei Nervenarten erregten, schwach aber auch die anderen. Es war diese Modification der Annahme nöthig, um die Veränderung des Farbentons reiner Spectralfarben bei grosser Lichtintensität, und die Resultate der Mischung von Spectralfarben zu erklären. Dieselbe Annahme würde ersichtlich auch geeignet sein, das vorliegende Phänomen zu erklären. Wenn das reine rothe Licht zwar die rothempfindenden Nerven überwiegend stark, schwach aber auch die anderen erregt, und die Empfindlichkeit jener ersten durch die starke Erregung schneller abnimmt, als die der letzteren, so muss der Farbeneindruck sich weisslichem oder grauem Roth nähern.

Wenn die primäre Farbe complementär zu der reagirenden Farbe des Grundes ist, so erscheint die letztere in der Ausdehnung des Nachbildes gesättigter als auf den nicht ermüdeten oder durch die Farbe des Grundes ermüdeten Theilen der Netzhaut. Wenn man auf einen rothen Grund ein blaugrünes Object legt, und nachdem man es eine Weile fixirt hat, es wegzieht, so erscheint ein gesättigt rothes Nachbild, ähnlich als hätte man ein schwarzes Object weggenommen. Man kann sich aber leicht überzeugen, dass die Farbe im Nachbilde eines complementären Objects noch gesättigter ist, als im Nachbilde eines schwarzen Körpers. Am einfachsten ist es, sich ein Object zu verfertigen, von dem ein Theil schwarz, ein anderer farbig, z. B. blaugrün ist, dies auf einen complementären (rothen) Grund zu legen, und einen Punkt des Grundes dicht an der Grenze des Schwarz und Blaugrün zu fixiren. Nimmt man das Object dann weg, so erscheint in dem ganzen Nachbild die Farbe des Grundes klarer als in dem vorher unbedeckten Theile des Grundes. Das Nachbild des Blaugrün ist etwas dunkler als das des Schwarz, aber es ist nicht das Roth, welches dort lichtschwächer wäre, vielmehr erscheint das Roth im Nachbilde des Schwarz wie von einem weisslichen Nebel übergossen, welcher im Nachbilde des Blaugrün das Roth freilässt. Es erscheint also das Nachbild des Roth auf Roth grauroth, des Schwarz auf Roth weissroth, des Blaugrün auf Roth gesättigt roth. Man sieht diese Unterschiede sehr gut, wenn man bei diesem Versuch alle drei Nuancen neben einander hat.

Setzt man voraus, dass das Roth des Grundes noch Weiss enthält, so erklärt sich der Erfolg leicht. Schwarz ermüdet das Auge gar nicht, es empfindet im Nachbilde unverändert das weissliche Roth des Grundes. Roth ermüdet das Auge für Roth, es empfindet im Nachbilde das Roth schwächer, die übrigen Bestandtheile des Weiss ziemlich ungeschwächt, die Empfindung ist die von lichtschwachem weisslichen Roth (Grauroth). Das Blaugrün macht dagegen das Auge unempfindlicher für die dem Roth fremdartigen Theile in dem Lichte des Grundes, und lässt also das Roth im Nachbilde freier von fremden Beimengungen heraustreten.

Dieselben Versuche gelingen nun aber ebenso gut mit reinen Spectralfarben. Ich habe im Felde eines Fernrohrs mir einzelne Theile des Spectrum hergestellt mit allen Vorsichtsmassregeln, welche nöthig sind, um die letzten Reste weissen Lichts zu entfernen. Der Grund war so tiefschwarz, dass man die Blendung des Fernrohrs auf ihm nicht mehr erkennen konnte, vielmehr die wolkigen Figuren des inneren Lichtnebels auf ihm sah. Das Auge wurde von keinem anderen Lichte, als dem eines kleinen Theils des Spectrum getroffen. Auf dieses farbige Feld warf ich nun Nachbilder von complementären Spectralfarben. Zu dem Ende war vor das Ocular unter 45° ein kleines bewegliches Stahlspiegelchen gestellt, in welchem man gespiegelt einen passend abgeblendeten Theil eines anderen sehr hellen Spectrum sah, durch eine kreisförmige Blendung abgegrenzt. Für dieses zweite Spectrum ist ein so hoher Grad von Reinheit nicht erforderlich. Die Anordnungen waren so getroffen, dass der ganze Kreis in der gleichen Farbe erschien. Sobald man das Spiegelchen vor dem Ocular fortzog, sah der Beobachter statt des bisher durch Reflexion gesehenen Kreises durch das Fernrohr auf das reine Spectrum. Auf diesem erschien das Nachbild des farbigen Kreises. Es traten hier genau dieselben Erfolge ein, wie bei den ähnlichen Versuchen mit Pigmentfarben. Namentlich erschien das Nachbild der Complementärfarben als eine gesättigtere Farbe im Vergleich mit der Farbe des Grundes. Der letztere schien wieder mit einem weisslichen Lichtnebel bedeckt zu sein, welcher an der Stelle des Nachbildes gleichsam fortgenommen war, und die Farbe des Grundes in ihrer grössten Reinheit hervortreten liess. Aus diesen Versuchen geht die wichtige Folgerung hervor, dass die gesättigtesten objectiven Farben, welche existiren, die reinen Spectralfarben, im unermüdeten Auge noch nicht die gesättigteste Farbenempfindung hervorrufen, welche überhaupt möglich ist, sondern dass wir diese erst erreichen, wenn wir das Auge gegen die Complementärfarbe unempfindlich machen.

Auch in diesem Falle könnte man glauben, dass der weissliche Schein, welcher den Grund überzieht, der innere Lichtnebel sei, dessen störende Theile im Nachbilde entfernt seien. In der That sieht man, wenn man das Auge auf den dunkeln Grund neben dem Spectrum richtet, ein complementär gefärbtes Nachbild. Auch in diesem Falle halte ich diese Erklärung für ungenügend, weil die Erscheinung auf sehr hellen Spectralfarben zu sehen ist, gegen welche die scheinbare Helligkeit des Lichtnebels verschwindend klein erscheint. Folgen wir dagegen der Annahme von Th. Young, so würden wir hier die reinen Farbenempfindungen der einzelnen Nervenarten vor uns haben, gegen welche

die Spectralfarben immer noch weisslich erscheinen müssen, weil nach der nothwendigen Modification jener Annahme jede einzelne Art homogenen Lichts nicht blos eine einzige Art von Nervenfasern ausschliesslich erregen kann.

Alle diese Versuche über Nachbilder farbiger Objecte auf farbigem Grunde kann man nun auch so anstellen, dass man den Fixationspunkt wechselt, oder das Object dem Auge nähert und wieder davon entfernt, wie dies vorher für weisse Objecte beschrieben ist. Hat man zum Beispiel eine blaue Scheibe auf gelbem Grunde eine Weile so betrachtet, dass man einen Punkt derselben fixirte, und wechselt nun den Fixationspunkt, so fällt das Nachbild der blauen Scheibe zum Theil auf den Grund, zum Theil auf die Scheibe; ebenso das Nachbild des Grundes. Wo das Nachbild der Scheibe auf den Grund fällt, erscheint das Gelb gesättigter, ebenso das Blau, wo das Nachbild des Grundes auf die Scheibe fällt. Dagegen erscheint das Blau und Gelb mit Grau gemischt, wo das Nachbild der Scheibe auf die Scheibe, und das Nachbild des Grundes auf den Grund fällt. Der Erfolg der übrigen Abänderungen dieser Versuche lässt sich leicht übersehen. Zuweilen mischen sich auch Contrasterscheinungen ein. Hat man ein weisses Papierschnitzelchen auf rothem Grunde fixirt, und wirft dann das Nachbild auf Weiss, so ist das Nachbild des rothen Grundes blaugrün, das des kleinen weissen Feldes roth durch Contrast zu jenem Grün, wie sich im nächsten Paragraphen zeigen wird. Am besten legt man zu dem Ende das farbige Papier auf ein weisses Blatt, auf das farbige dann ein weisses Schnitzelchen, welches man mit einer Pincette festhält, während man das farbige Blatt wegzieht. Schwach erscheint eine solche Contrastfärbung auch um das Nachbild eines farbigen Quadrats auf weissem Grunde.

Aber nicht nur farbige, sondern auch weisse Objecte geben farbige Nachbilder, in denen die Farben gewöhnlich mannigfach wechseln. Man bezeichnet diese Erscheinungen gewöhnlich als das farbige Abklingen der Nachbilder. Die Reihenfolge der Farben ist dabei verschieden, je nach der Dauer und der Intensität des primären Eindrucks. Die Farbenfolge nach momentaner Anschauung finde ich übereinstimmend mit Fechner [1] und Seguin [2]. Das ursprüngliche Weiss geht schnell durch grünliches Blau (Seguin Grün) in schönes Indigblau, später in Violett oder Rosenroth über. Diese Farben sind hell und klar. Dann folgt ein schmutziges oder graues Orange, während dessen sich das positive Nachbild meist schon in ein negatives verwandelt, und im negativen Bilde wird dieses Orange oft noch ein schmutziges Gelbgrün. Nach sehr kurzer Einwirkung des primären Lichts ist meist das Orange die letzte Farbe, und das Bild schwindet, ehe es negativ wird. Dieselbe Farbenfolge fand auch Aubert nach der Betrachtung des etwas bläulich gefärbten Entladungsfunkens einer Leydener Flasche, nur war das Orange auf dunklem Grunde nicht deutlich erkennbar, auf weissem dagegen sowohl diese Farbe als das folgende Grün sehr deutlich. Umgeben ist das Bild von einem gelben Hofe, wohl dem negativen Nachbilde des durch unregelmässige Brechung im Auge zerstreuten bläulichen Lichts.

[1] Pogg. Ann. L. 220.
[2] *Annales de Chemie.* 3. Ser. XLI. 415—416.

Die bisher beschriebenen Erscheinungen beziehen sich auf den Verlauf des Nachbildes im ganz dunkeln Felde. Wenn es dabei überhaupt zur Bildung negativer Nachbilder kommt, so erscheinen diese nur in das Eigenlicht des dunkeln Feldes dunkel eingezeichnet. Wenn man nun während des Bestehens eines solchen Nachbildes allmälig reagirendes Licht zulässt, indem man die Hände, oder ein dunkles Tuch, mit dem man die Augen bedeckt hat, langsam hinwegzieht, so beobachtet man im Allgemeinen, dass das Nachbild dabei in die späteren Stadien seiner Farbenentwickelung übergeht, und wieder zurückschreitet, wenn man das reagirende Licht wieder schwächer macht. Lässt man z. B. Licht hinzutreten, während das Bild im absoluten Dunkel blau ist, so geht es durch Rosaroth in ein negatives gelbes Bild über. Deckt man schnell genug wieder zu, so findet man das Blau wieder. Ist das Bild im absoluten Dunkel rosaroth, so wird es durch schwaches Licht gelbroth u. s. w. Wenn das positive Nachbild im dunkeln Gesichtsfelde schliesslich ganz geschwunden ist, sieht man auf schwach erleuchtetem Grunde noch längere Zeit ein graues oder grüngraues negatives Nachbild, und der hellere Grund, der es umgiebt und der den nicht ermüdeten Stellen des Auges entspricht, erscheint dann rosaroth.

Zur Erklärung dieser Erscheinungen hat Plateau die Annahme gemacht, dass die Dauer der einzelnen Stadien der Nachbilder für die verschiedenen Farben verschieden sei, und er suchte dies durch die im vorigen Paragraphen erwähnten Versuche auch direct zu erweisen. Um eine vollständige Erklärung zu geben, müssten wir nicht blos den Verlauf der nachbleibenden Reizung, sondern auch den Verlauf der Ermüdung vollständig kennen. Indessen lässt sich doch einiges aus ihnen schliessen. Im ganz dunkeln Gesichtsfelde sind nämlich die ersten hellsten Stadien der Erscheinung ziemlich unabhängig von dem Grade der Ermüdung, weil diese erst in Betracht kommt, sobald die Helligkeit des positiven Nachbildes sich von der des inneren Lichtnebels nicht mehr sehr unterscheidet. Wir können deshalb als wahrscheinlich annehmen, dass die grünblaue, blaue und rosarothe Phase nur von der nachbleibenden Reizung bedingt sind, während bei der gelben und grünen, in denen sich das negative Nachbild ausbildet, auch die Ermüdung in Betracht kommt. Wir müssen daraus schliessen, dass die nachbleibende Reizung für die drei Farben Roth, Grün, Violett in der Weise abnimmt, wie die nebenstehende *Fig. 147* es darstellt. Darin bedeuten die horizontalen Abscissen die Zeit, die verticalen Ordinaten der Curven die Intensität der Reizung. Die ausgezogene Linie entspricht dem Grün, die punktirte dem Violett, die gestrichelte dem Roth. Die positive Nachwirkung nimmt für alle Farben continuirlich ab, aber so, dass die Abnahme des Roth im Anfang die schnellste, nachher die langsamste ist, die des Grün anfangs die langsamste, nachher die schnellste. Bei den dargestellten Grössen der Farbenempfindung wird in der

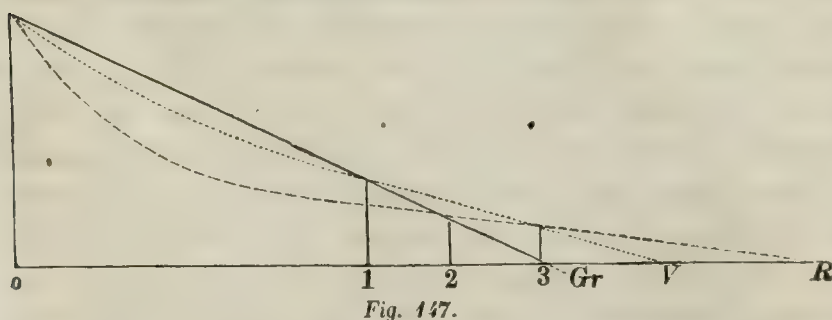


Fig. 147.

Zeit von 0 bis 1 Blaugrün überwiegen, bei 1 Blau, bei 2 Violett, bei 3 Purpur, welcher allmälig sich mehr in das Rothe zieht. Nun mischt sich in Wirklichkeit aber die Ermüdung ein, welche in dem weisslichen inneren Lichtnebel ein grünliches Nachbild entwickelt, so dass also die Ermüdung für Grün, dessen nachbleibende Erregung am schnellsten geschwunden ist, schliesslich am geringsten zu sein scheint. Dieses grüne negative Bild, mit positivem Roth gemischt, wird ein Gelb geben, welches je nach der grösseren Stärke des einen oder anderen heller oder dunkler, als der Grund erscheinen kann, und zuletzt in Grün übergeht, wenn auch das Roth erlischt. Bei PLATEAU's Versuchen über die Dauer der Farbeneindrücke stellte sich dasselbe Gesetz der Abnahme heraus, dass diejenigen Eindrücke, welche im Anfang am schnellsten abnahmen, schliesslich am längsten in schwachen Resten dauerten. Ganz anders gestaltet sich die Reihe der Farbenerscheinungen, wenn die Ermüdung grösser geworden ist, wie es nach längerer Einwirkung weissen Lichts, oder nach Einwirkung sehr intensiven Lichtes stattfindet. Bei längerer Einwirkung weissen Lichtes zeigt sich nach FECHNER's Beobachtungen der Einfluss der Ermüdung schon während der Betrachtung des Weiss, dadurch dass dieses farbig wird. Nachdem er die Augen eine Zeit lang geschlossen gehalten hatte, um die Nachwirkung früherer Eindrücke zu beseitigen, richtete er dieselben auf ein weisses im Sonnenschein auf schwarzem Papier liegendes Feld. In den ersten Momenten liess sich wegen einer Art von Blendung kein sicheres Urtheil über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein einer Farbe fällen; eine solche scheint sich in der That erst nach einiger Zeit zu entwickeln. Bald nämlich färbt sich das Papier entschieden gelb, dann blaugrau oder blau, ohne dass bei oftmaligen Versuchen eine Uebergangsstufe durch Grün wahrzunehmen gewesen wäre, dann rothviolett oder roth. Die gelbe Phase ist die kürzeste; die blaue dauert oft ziemlich lange, ehe sie in die folgende übergeht. Nach der rothen oder rothvioletten konnte er keine weitere wahrnehmen, obgleich er den Versuch bis zu grosser Anstrengung des Auges fortsetzte. Auch im verbreiteten Tageslichte nahm er die angegebene Folge der Färbungen oft wahr, obschon einmal mit grösserer Entschiedenheit als das andere Mal; die beiden letzten Färbungen erkannte er hier in der Regel leichter als die erste gelbe. FECHNER stellt die Erscheinungen durch drei Curven, aber mit anderen Grundfarben vor, ähnlich denen der *Fig. 148*, wo wieder die horizontalen Abcissen der Zeit proportional sind, die verticalen der Erregungsstärke der Netzhaut bei dauernder Betrachtung einer weissen Fläche. Die ausgezogene Curve entspricht dem Grün, die punktirte dem Roth, die gestrichelte dem Violett. In der Zeit von 0 bis 1 würde die Farbe gelbgrün, zur Zeit 1 weisslich grün, bei 2 weisslich blau, bei 3 violett, später rosaroth sein.

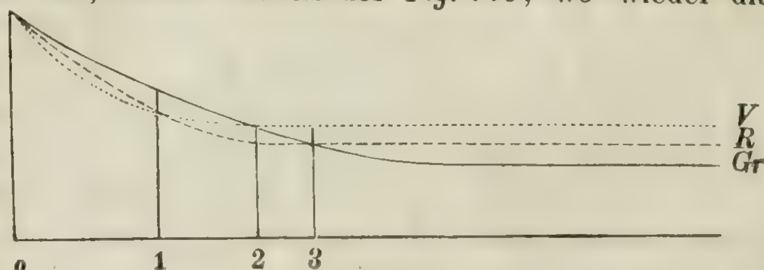


Fig. 148.

Nach längerer und stärkerer Einwirkung primären weissen Lichts zeigt das Nachbild auf ganz dunklem Grunde folgende Farbenreihe: Weiss, Blau,

Grün, Roth, Blau und auf weissem Grunde schliesslich noch blaugrün und gelb. Beim Roth wird das Bild negativ. Seguin schaltet in seiner Beschreibung einige Zwischenstufen mehr ein. Die Farben der ersten Reihe sind ihm Weiss, Grün, Blau, die der zweiten (negativen) Gelb, Roth, Violett, Blau, Grün. Wenn die Einwirkung des weissen Lichts eine gewisse Zeit überdauert hat, ist diese Farbenreihe constant und wird durch längere Einwirkung nicht weiter geändert. Bei einer kürzeren, aber doch nicht blos momentanen Dauer der primären Lichtwirkung, wo das primäre Weiss sich deutlich gelb gefärbt hatte, war die Farbenfolge Gelb, Blau, Rothgelb, dann wurde es negativ grün. Brücke giebt an: Grün, Blau, Violett, Roth, dann negativ ohne deutliche Farbe. Die blaue Phase scheint also immer die erste Aenderung des primären Lichteindrucks zu sein, dann folgt eine rosenrothe, rothgelbe bis grüne positive Phase, je nach der Dauer des primären Eindrucks.

Auch bei diesen farbigen Nachbildern bestätigt sich die Regel, dass Erhellung des Grundes durch weisses Licht die späteren Phasen des Nachbildes herbeiführt, während Verminderung des reagirenden Lichtes das Nachbild wieder auf frühere Phasen zurücktreten lässt. So oft ich Nachbilder beobachtet habe von gleichmässig erleuchteten Flächen, für deren Umrisse mein Auge gut accommodirt war, habe ich die Farbenveränderungen des Nachbildes entweder auf der ganzen Fläche gleichzeitig, oder auch wohl unregelmässig von dieser oder jener Seite vorschreitend gesehen. Dagegen ist es nach dem Anblicke der Sonne oder ähnlicher blendender Objecte gewöhnlich, dass die Farbenveränderungen des Bildes vom Rande nach der Mitte hin vorschreiten. Ausser den Unregelmässigkeiten der Brechung, welche für hellere Objecte immer grössere Mengen Licht in die Nachbarschaft des Bildes verbreiten, kommt hier auch wohl in Betracht, dass bei schmerzhafter Blendung des Auges es fast unmöglich wird, die Accommodation und Richtung des Auges festzuhalten. Die Folge davon ist, dass die der Mitte des Sonnenbildes entsprechende Stelle der Retina anhaltender und intensiver der Lichtwirkung unterworfen wird, als die dem Rande jenes Bildes näheren. An den Sonnenkörper selbst schliesst sich ringsum der Widerschein des in der Atmosphäre und im Auge selbst diffus zerstreuten Lichts. Wenn man das im Dunkel ausgeruhte Auge plötzlich für einen Augenblick nach der Sonne blicken lässt, so erkennt man in der blendenden Lichtfläche kaum die Umrisse des Sonnenkörpers. So hat man denn in diesen Fällen immer eine vom Centrum nach der Peripherie hin allmälig abnehmende Lichtwirkung, und der entspricht im Nachbilde ein verschiedener Verlauf der einzelnen Phasen. Je intensiver die Wirkung, desto langsamer verlaufen im Ganzen die einzelnen Phasen, so dass man am Rande des Nachbildes meist die früheren Stadien sieht, welche allmälig gegen das Centrum vorrücken. Ausserdem ist die Reihenfolge der Farben in den peripherischen Theilen wegen der geringeren Ermüdung meist etwas abweichend von der in der Mitte. Das Nachbild hat in seinen ersten Stadien dieser Erklärung entsprechend einen grösseren Umfang als die scheinbare Grösse der Sonne beträgt, und man verfällt leicht in den Fehler, das ganze Nachbild für das Bild der Sonnenscheibe allein zu halten, und zu glauben, dass die verschiedenen farbigen Ringe, die sich darin entwickeln, dieser selbst

angehören, während sie in Wirklichkeit ihrer Umgebung entsprechen. Um das Nachbild der Sonne möglichst regelmässig zu entwickeln, nehme ich ein sehr dunkel gefärbtes Glas (oder ein berusstes Glas oder mehrere complementär gefärbte Gläser über einander gelegt), sehe damit nach der Sonne hin, welche durch das Glas nur noch als eine schwach sichtbare Lichtscheibe erscheinen muss. Dann nehme ich das Glas für einen Moment weg, und schliesse sogleich die Augen. So werden dieselben verhältnissmässig wenig angegriffen, und haben wenig Zeit, ihre Stellung zu verändern, während doch das Nachbild sich sehr glänzend entwickelt. Unter diesen Umständen finde ich auch im Nachbilde meist einen Kern, welcher in seiner ganzen Ausbreitung eine gleichmässige Färbung hat, und ziemlich die Grösse der scheinbaren Sonnenscheibe besitzt, so dass man die Abweichungen, welche am Rande vorkommen, den Fehlern der Brechung im Auge zuschreiben kann.

Man sieht unter diesen Umständen in der Umgebung des Sonnenbildes schnell die Phasen des Nachbildes verlaufen, welche weisse Gegenstände nach momentanem Anblick geben. Positives Blau, Rosaroth, welches durch Gelb in negatives Dunkelgrün übergeht, während das Bild der Sonne selbst in dieser ersten Phase als ein verwaschener, nicht regelmässig runder weisser Fleck erscheint, der ungefähr zu der Zeit, wo der Grund rosenroth geworden ist, in die zweite Phase tritt, und sich hellblau färbt. Die zweite geht meist schnell in die dritte Phase über, indem das Blau zuerst am Rande, dann auch in der Mitte grün wird, während am Rande ein rothgelber Saum entsteht, der dunkler als die Umgebung ist, und an dessen äusserem Rande sich dann auch wohl schon in dieser Phase ein noch dunklerer blaugrauer Saum abzeichnet. Richtet man die Augen während dieser Phase auf ein weisses Feld, so verwandelt sich das positive Grün durch Violett in das negative Blutroth der folgenden Phase.

Die vierte Phase entsteht, indem das Roth des Saumes sich über die Mitte des Bildes verbreitet. Der blaugraue Saum wird dafür breiter und dunkler. Das ganze Nachbild ist jetzt dunkler als die Umgebung. Letztere erscheint im Gegensatz dazu weisslich oder grünlich. Es ist dies das letzte negative Grün vom Bilde der Himmelsfläche. Die etwa vorhandenen Nachbilder der Fensterstäbe erscheinen darin hell. Blickt man in dieser Phase auf weissen Grund, so geht das Roth in Grünblau über.

In der fünften Phase endlich nimmt das ganze Nachbild die blaue Farbe des bisherigen Saumes an, und verschwindet im dunkeln Felde meist in diesem Stadium des Blau, während es auf weissem Felde grünblau erscheint.

Diesen von Fechner aufgestellten Phasen möchte ich noch eine sechste anschliessen, wo man im dunkeln Felde vom Nachbilde nichts mehr erkennt, wohl aber auf weissem Felde noch einen gelben oder bräunlichen Schein sieht. Endlich nach ziemlich langer Zeit schwindet auch dieser. Hat man während dieser Zeit, und selbst noch später, wo der gelbe Schein geschwunden ist, auf Weiss gesehen, und schliesst plötzlich die Augen, so tritt noch wieder ein schwaches positives bläuliches Nachbild auf, welches schnell wieder schwindet. Oeffnet man dann die Augen, indem man sie auf Weiss richtet, so sieht man im ersten Augenblick noch wieder das gelbe Nachbild. Die Erklärung dieser

Erscheinung scheint mir in dem schon erwähnten Umstande zu suchen, dass in einem ermüdeten Nerven die neue Reizung langsamer verschwindet, als in den umgebenden unermüdeten Theilen der Netzhaut.

Es scheint übrigens der Verlauf dieser Nachbilder intensiven Lichts bei verschiedenen Personen nicht wesentlich verschieden zu sein, wenn sie unter denselben Umständen entwickelt werden; wenigstens stimmen in dieser Beziehung meine eigenen Beobachtungen, so weit sie reichen, mit Fechner's und Seguin's überein.

Bei dieser complicirteren Farbenfolge dürfen wir vermuthen, dass durch die stattfindende Ermüdung die Zeit, in der die Eindrücke der einzelnen Farben in der Netzhaut schwinden, so wie auch die Perception des inneren Lichtnebels geändert sei, und da wir weder diese Verhältnisse genau genug kennen, noch wissen, wie die Ermüdung selbst bei verschiedenen Graden derselben für die einzelnen Farbenempfindungen verschwindet, so ist eine vollständige Erklärung der einzelnen Stadien dieses farbigen Abklingens nicht möglich. Um sie zu geben, würde zuerst der Verlauf der Ermüdung und ihr Einfluss auf den Verlauf der Erregung für die einzelnen reineren Farbeneindrücke bestimmt und verglichen werden müssen.

Wenn wir das Abklingen des Nachbildes nach Eindrücken gesättigter Farben genau beobachten, ist die Erscheinung allerdings sehr viel einfacher, aber es fehlen Farbenveränderungen doch nicht ganz. Die Hauptzüge der Erscheinung sind schon vorher angegeben worden. Es erscheint zuerst ein positives dem primären Lichte gleich gefärbtes, später ein negatives complementäres Bild. Der Uebergang von positiv zu negativ geschieht nun aber nach lebhafteren Lichteindrücken in der Regel nicht so, dass das eine Bild einfach erblasst, und dann das andere sichtbar würde, sondern in diesem Uebergangsstadium verändert sich die Farbe durch weissliche Farbentöne hindurch. Hat man nur eine primäre Farbe im Gesichtsfelde gehabt, so erscheinen die Farben des abklingenden Bildes noch immer ziemlich gesättigt, und sind von mehreren Beobachtern als gesättigte Farben angegeben worden, weil es im dunkeln Gesichtsfelde an einem Vergleichungspunkte fehlt. Wenn man aber an dem nur momentan gesehenen primären Objecte verschiedene Farben von ungefähr gleicher Helligkeit vor sich hatte, so sieht man, dass die Nachbilder im Uebergangsstadium von positiv zu negativ viel geringere Farbenunterschiede zeigen, als die ursprünglichen Farben, indem sie alle stark gemischt sind mit dem rosarothen oder gelblichen Weiss, welches auch die Nachbilder momentan gesehener weisser Objecte zeigen. In dieser Beziehung ist namentlich das Nachbild eines momentan angeschauten prismatischen Spectrum interessant. Nachdem noch einige Secunden die primären Farben im Nachbilde sichtbar gewesen sind, und die lichtschwachen äussersten Farben sich ganz verdunkelt haben, verwandelt sich das ganze Nachbild in einen röthlich weissen Fleck von der Gestalt des Spectrum, in welchem Farbenunterschiede kaum noch angedeutet sind, nur zieht das frühere Gelb und Orange etwas in das Bläuliche, woran sich an der Stelle des früheren Roth dessen, schon negativ gewordenes grünblaues Nachbild anschliesst. Um mich über den Ort der früheren Farben im Nachbilde orientiren zu können, musste ich auf

dem weissen Schirm, auf den das Spectrum projicirt war, einen schwarzen Strich machen, der parallel den Farbenstreifen das Spectrum schnitt, und im Nachbilde sichtbar blieb. So erkannte ich, dass das röthlich weisse Nachbild der ganzen Ausdehnung des Spectrum vom Orange bis Indigo entspricht. Dasselbe Resultat gewinnt man, wenn man farbige Papiere von nahe gleicher Helligkeit von der Sonne bescheinen lässt, und durch momentanes Anschauen ein Nachbild entwickelt.

Es geht hieraus hervor, dass im positiven Nachbilde gefärbter Objecte nach momentanem Anblicke zuerst die vorherrschende Farbe schwindet, und damit das Nachbild dem eines weissen Objects ähnlich wird, wobei namentlich gewöhnlich die rosenrothe Phase eines solchen hervortritt. Dann entwickelt sich allmälig die Complementärfarbe des negativen Nachbildes, aber sie kann schon sichtbar werden, nach ehe das positive Bild negativ geworden ist, sie kann also heller erscheinen als der dunkle Grund. Ich glaube das Hervortreten der Complementärfarbe darauf zurückführen zu können, dass sich zu dieser Zeit das schwach und weiss gewordene positive Bild deckt mit dem durch die Ermüdung des Auges in dem inneren Lichtnebel entstehenden negativen und complementären Bilde. Es ist klar, dass durch eine solche Deckung z. B. nach Anblick von Roth positives Weiss und negatives Blaugrün zusammen ein grünlich weisses positives Bild geben können. Diese positiv complementären Bilder sind von mehreren Beobachtern [1] erwähnt. Hat man sie allein oder nur mit der primären Farbe zusammen im Gesichtsfelde, so erscheint die Complementärfarbe ziemlich gesättigt. Kann man sie aber mit Nachbildern anderer Farben vergleichen, so habe ich stets gefunden, dass die Complementärfarbe stark mit Weiss oder Grau gemischt erschien, so lange sie noch heller als der Grund war, erst im negativen Nachbilde entwickelt sie sich dann gesättigter.

Im Sinne von Th. Young's Farbentheorie würden wir diese Erscheinungen so erklären, dass jede, auch die gesättigteste objective Farbe subjectiv mit Weiss gemischt ist, dass die starke Erregung, welche der vorherrschenden Farbe entspricht, verhältnissmässig schneller abnimmt, als die schwachen Erregungen, welche den anderen im Weiss enthaltenen Farben entsprechen, so dass der gesammte Farbeneindruck, indem er schwächer wird, auch sich dem Weiss nähert. Dann gewinnt in den lichtschwächeren Stadien des positiven Bildes endlich auch das durch Ermüdung bewirkte negative Bild mit seiner Färbung einen merklichen Einfluss.

Bei den einzelnen Farben geschieht das Abklingen nach momentanem Anblicke in etwas verschiedener Weise, je nach ihrer Verwandtschaft mit den Farbentönen des abklingenden Weiss. Beim Grün ist es meist am einfachsten, weil seine Complementärfarbe Rosaroth dem Rosaroth des abklingenden Weiss gleich ist. Dieser Farbenton entwickelt sich deshalb besonders hell und schön. Grünliches Blau geht durch Blau und Violett, Blau durch Violett in Rosaroth über, im letzteren Falle entwickelt sich die folgende Phase des Gelb reiner und

---

[1] Purkinje. Zur Physiologie der Sinne. II. 110. — Fechner in Pogg. Ann. L. 213. — Brücke. Untersuchungen über subjective Farben, aus den Denkschr. der Akad. zu Wien. Bd. III. S. 12.

kräftiger, weil sie mit der Complementärfarbe des Blau zusammenfällt. Die vor dem Rosaroth liegende grünblaue und blaue Phase des abklingenden Weiss kann sich bei den bisher genannten Farben wegen ihrer Aehnlichkeit mit diesen Farben selbst nicht wohl bemerklich machen, scheint es aber zu thun beim Gelb, welches durch grünliches Weiss in Violett übergeht, und beim Roth. Bei dem letzteren tritt statt des Rosaroth mehr eine violette, später graugrüne Farbe ein. Es schwindet übrigens verhältnissmässig am schnellsten. Dass die grüne Stufe, wenn man keine anderen Farben zur Vergleichung im Gesichtsfelde hat, häufig gesättigt grün erscheint, ist schon vorher erwähnt. Es stimmen mit diesen Beobachtungen im Wesentlichen auch die Versuche von Aubert, welche er bei Betrachtung des elektrischen Funken durch farbige Gläser erhielt, nur das sehr gemischte Gelb gab ihm noch die gelbe Stufe des abklingenden Weiss nach dem Violett, ehe es zum negativen Blau kam. Meist auch bildete sich ein Lichthof, der die Stadien schneller durchlief.

Nach längerer oder stärkerer Einwirkung primären farbigen Lichts machen sich ebenfalls während des Ueberganges von dem positiven gleichfarbigen zum negativen complementärgefärbten Bilde einige von den Phasen merklich, welche weisses Licht zu dieser Zeit zeigt. Namentlich tritt vielfach der rothe Saum, und um diesen der blaugraue Saum auf. Fechner hat dergleichen Versuche angestellt, indem er durch Combinationen verschiedener farbiger Mittel, welche nur eine eine oder zwei Farben des Spectrum durchliessen, nach der Sonne sah; ich selbst kann einige Beobachtungen hinzufügen, welche ich mit prismatischen Farben angestellt habe, indem ich eine runde Oeffnung betrachtete, durch welche Sonnenstrahlen, die ein Prisma passirt hatten, traten. Wenn das farbige Licht so intensiv ist, dass es weiss oder gelb erscheint, so bleibt dies auch anfangs im Nachbilde, dann entwickelt sich aber allmälig die eigentliche Farbe deutlich.

Homogenes rothes Licht brachte Fechner hervor, indem er theils durch ein rothes Glas, theils durch eine dicke Schicht Lackmustinctur nach der Sonne sah. Bei directer Betrachtung erschien es wegen seiner hohen Intensität gelb. Auch das Nachbild war anfangs gelb, am Rande roth, und wurde später durch Verminderung seiner Intensität ganz roth, gleichzeitig tauchte ein schwarzblaugrüner Saum auf. Im dunkeln Felde entwickelt sich bei diesem Versuche gewöhnlich kein deutliches negatives Bild. Auf weissem Grund dagegen wird die grünblaue Farbe des Saumes central. Ich habe dasselbe an prismatischem Roth gesehen. Der Uebergang vom Roth zum Grünblau geschah bei diesen Versuchen durch Violett. Nach etwas andauernder Betrachtung einer Flamme durch ein rothes Glas geschieht er dagegen meist durch ein positives Gelbgrün, dem das negative Grünblau folgt.

Homogenes Gelb erhielt Fechner durch Combination zweier blassgelben, eines grünen und eines blassrothen Glases, wobei ausser Gelb nur wenig Grün durchging. Das Nachbild erschien gelb mit rothem Rande, um letzteren bildete sich ein dunkel blaugrüner Ring. Bei einem einfachen gelben Glase, welches Roth, Gelb, Grün und eine Spur von Blau durchliess, folgte sich Gelb, Grün, dann Blaugrau mit rothschwarzem Umring. Bei reinem prismatischen Gelb sah ich ebenfalls den Uebergang in Grün und den rothschwarzen Umring. Das

Grün und Roth kommen im Nachbilde des Weiss unter denselben Umständen vor. Dagegen sah PURKINJE [1], nachdem er eine Kerzenflamme 12 bis 60 Secunden angeschaut hatte, die Farbenfolge: blendend weiss, gelb, roth, blau, mild weiss, schwarz.

Ziemlich reines Grün, mit Gelb gemischt, erhielt FECHNER durch ein grünes, ein hellblaues und zwei hellgelbe Gläser. Die Sonne erschien dadurch grünlichweiss; ebenso das Nachbild mit schwarzrothem Umringe. Grün, mit sehr wenig Blau und Gelb gemischt, erhielt er durch drei grüne und ein gelbes Glas. Die Sonne erschien fast weiss, das Nachbild ebenso etwas grünlich mit bläulichweissem Saum, später bläulichweiss mit schwarzrothem Umring, um den eine Zeit lang ein schwach lilafarbener Schein sichtbar war. Ich selbst erhielt von prismatischem Grün ein grünes Nachbild, blau gesäumt, und auf weissem Grunde dunkles Purpur, gelb gesäumt.

Blau, mit Grün gemischt, erhielt FECHNER durch eine Kupferlösung. Die Sonne erschien, dadurch gesehen, weiss. Das Nachbild anfangs ebenso weiss, dann blau. Es entwickelte sich dann ein positiv grüner, um diesen ein negativ rother Rand. Prismatisches Blau erzeugte mir ebenfalls den purpurnen Saum, während die Umgebung complementär Goldgelb gefärbt erschien.

Homogenes Violett erhielt FECHNER mittels einer dicken Schicht schwefelsaurer Kupferlösung, mit Ammoniak versetzt, und eines violetten Glases. Die Sonne erschien bläulichweiss. Ebenso anfangs das Nachbild; es bekam dann einen dunkelvioletten, um diesen einen schwarzrothen Umring, die Umgebung grünlich. Die Erscheinung verschwand, ehe der Umring central wurde.

In allen diesen Fällen zeigt sich, wo der Saum des Nachbildes anfängt negativ zu werden, der rothe Saum, der auch bei den Nachbildern des Weiss eintritt, als wäre die homogene Farbe mit Weiss gemischt, dessen Abklingungsphasen sich merklich machen zu der Zeit, wo die positive Nachwirkung der Hauptfarbe mit der complementären negativen sich im Gleichgewicht hält.

Wenn das primär gesehene weisse oder farbige Licht von geringer Stärke oder bei mässiger Stärke von sehr geringer Dauer ist, so bleiben positive Bilder zurück, die durch sehr schwach gefärbte weissliche Töne abklingen, deren Farbenton schwer zu benennen ist und durch Contraste in der auffälligsten Weise abgeändert werden kann, wodurch denn die sonderbarsten scheinbaren Widersprüche in den Resultaten eintreten. Hat man viele verschieden gefärbte Objecte im Gesichtsfelde, so blassen die Farbenunterschiede im Nachbilde aus. Dieser Art scheinen auch die von AUBERT bei Beleuchtung farbiger Objecte mit dem elektrischen Funken erhaltenen Nachbilder gewesen zu sein. So erscheinen ihm rothe Quadrate auf Weiss im Nachbilde roth, ein breiterer rother Streifen, aus demselben Papier geschnitten, mit weissen Quadraten auf weissem Grunde dagegen grün. Das Nachbild blauer und gelber Streifen mit schwarzen Quadraten auf schwarzem Grunde erschien ihm immer gelb, auf weissem Grunde lieferten beide Streifen blaue Nachbilder. Wovon diese Verschiedenheiten abhingen, bleibt noch zu ermitteln.

---

[1] Beobachtungen und Versuche. I. 100.

Andere Erscheinungen des farbigen Abklingens beobachtet man an rotirenden Scheiben, welche schwarze und weisse Sectoren haben, und nicht so schnell rotiren, dass ein ganz continuirlicher Eindruck im Auge entsteht. Wenn man eine solche Scheibe anfangs langsam, dann allmälig schneller rotiren lässt, und sie anhaltend betrachtet, aber so, dass man vermeidet der bewegten Figur mit dem Blicke zu folgen, bemerkt man, dass das Weiss sich färbt, und zwar an dem vorangehenden Rande röthlich, an dem hinterher folgenden bläulich. Bei schwächerem Licht zieht der röthliche Farbenton mehr in das Rothgelbe, der bläuliche in Violett, bei stärkerem der erste in Rosaroth, der letztere in Grünblau. Bei langsamer Rotation ist der bläuliche Ton anfangs über einen breiteren Theil des Weiss ausgedehnt als der röthliche. Bei schneller Rotation dagegen breitet sich das Roth als Rosaroth über das ganze Weiss aus, während das Grünblau auf die schwarzen Sectoren hinüberrückt; im Ganzen erscheint dann auf der Scheibe das Violett zu überwiegen. Bei noch schnellerer Rotation kann man die verschiedenen Sectoren nicht mehr von einander scheiden, man sieht dann das Feld fein gesprenkelt, und die Flecke zwischen violettem Rosa und Grüngrau hin und her flimmern. Endlich bei noch weiterer Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit wird das Flimmern schwächer, die graue Mischfarbe des Weiss und Schwarz tritt immer mehr hervor, und ist nur noch von veränderlichen grösseren Flecken von violettem Rosa überlaufen, welche wie die Flecken und Streifen in gewässertem Seidenzeug geformt sind.

Man sieht diese verschiedenen Stadien der Erscheinung sehr gut neben einander, wenn man eine Scheibe in drei concentrische Ringe abtheilt, wie in *Fig. 149*, und dem innersten 2 schwarze und 2 weisse Sectoren, dem mittleren von beiden je 4, dem äusseren je 8 giebt. Wenn die Scheibe mit gewisser Schnelligkeit rotirt, hat man auf dem innersten Felde die überwiegend grünliche Färbung des Weiss, im mittleren die rosarothe, im äussern das feingesprenkelte Flimmern. Bei grösserer Geschwindigkeit zeigt das innere Feld die rosarothe Färbung, das mittlere das feingesprenkelte Flimmern, das äussere das mit Violett gewässerte Grau. Ich bemerke dabei noch, dass derjenige Streif, auf welchem das Rosaroth am reinsten entwickelt ist, immer dunkler erscheint als die benachbarten Streifen, in denen der Wechsel langsamer oder schneller stattfindet. Die Ordnung der Farben, wie sie zuerst auf den weissen Streifen auftreten, ist an einer in Sectoren getheilten Scheibe erst nach einiger Uebung zu erkennen, leichter an einer Scheibe (*Fig. 150*, Seite 381), die von einer schwarzen und einer gleich breiten weissen Spirallinie bedeckt ist. Es geht daraus hervor, dass wenn ein Punkt der Retina in schneller Abwechselung von weissem Lichte getroffen und wieder verdunkelt wird, so dass die Netzhaut sich im Zustande abwechselnd steigender und sinkender Erregung findet, die Zeit der Maxima der Erregung nicht für alle Farben auf denselben



Fig. 149.

Augenblick fällt, sondern die Erregung für Roth und Violett früher eintritt als für Grün.

Es treten diese Farbenerscheinungen gewöhnlich nicht im ersten Augenblicke des Hinsehens ein, sondern erst nach einiger Zeit, und werden dann allmälig immer glänzender. Es scheint also ein gewisser Grad von Ermüdung des Auges durch das flimmernde Licht dafür nothwendig zu sein. Ausserdem verbinden sich damit nun noch andere Erscheinungen, welche von einer verschiedenen Empfänglichkeit verschiedener Stellen der Netzhaut für diese Art von Reizung herzurühren scheinen. Es werden nämlich in dem flimmernden Licht gewisse Muster sichtbar, die zum Theil in Beziehung zu bestimmten Stellen der Netzhaut stehen, PURKINJE's[1] Lichtschattenfigur. Wenn nämlich die Geschwindigkeit der Scheibe so gross geworden ist, dass man die einzelnen Sectoren nicht mehr einzeln erkennt, so erscheint die Zahl der Sectoren vermehrt, und diese bilden gleichsam ein Gitter von verwaschen gezeichneten und gekrümmten Stäben, dessen Maschen in Richtung des Radius der Scheibe am längsten sind. Bei steigender Schnelligkeit der Bewegung wird die Zeichnung feiner, ähnlich der eines Stickmusters, und es erscheint an derjenigen Stelle des flimmernden Feldes, welche dem gelben Flecke entspricht, eine eigenthümliche in schärferen Gegensätzen von Licht und Dunkel gezeichnete rundliche oder querovale Figur, zu vergleichen etwa mit einer vielblätterigen Rose, deren Blätter aber sich einer sechseckigen Form nähern. In ihrem Centrum steht ein dunkler Punkt, von einem hellen Kreis umgeben. Dieselben Figuren kann man auch hervorbringen, indem man mit geschlossenen Augenlidern sich gegen ein helles Licht kehrt, und die aus einander gespreizten Finger vor dem Auge hin und her bewegt, so dass das Auge in schnellem Wechsel beleuchtet und beschattet wird. Ueberhaupt kommt es nur darauf an, einen solchen schnellen Wechsel von Schatten und Licht hervorzubringen. PURKINJE unterscheidet bei diesen Figuren die primären und secundären Gestalten. Die primären Gestalten sind in seinem rechten Auge grössere und kleinere Vierecke, schachbrettartig dunkel und hell wechselnd, die den grössten Theil des Gesichtsfeldes überziehen. Nur abwärts vom Mittelpunkte sieht er grössere Sechsecke in einer Strecke ausgebreitet. Von der in meinen Augen ziemlich regelmässig ausgebildeten Rosette des gelben Flecks scheint er nur einzelne Züge gesehen zu haben, dagegen sind bei mir die Flecken ausserhalb des Centrum weder regelmässig viereckig noch sechseckig, sondern unregelmässig, nach der Peripherie an Grösse zunehmend. Aehnlich sah sie



Fig. 150.

[1] Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Bd. I. Prag 1823. S. 10.

auch PURKINJE mit seinem schwachsichtigen linken Auge. Als secundäre Gestalten, die namentlich wenn er die geschlossenen Augenlider gegen die Sonne kehrt, erscheinen, beschreibt PURKINJE achtstrahlige Sterne, und eigenthümliche eckig gebrochene Spirallinien, welche sich aus den primären Mustern durch Verschiebung der hellen und dunkeln Vierecke entwickeln, übrigens sehr wandelbar sind. Die secundären Gestalten erschienen ihm im linken, wie im rechten Auge nur symmetrisch umgestellt.

Beobachtet man diese Erscheinungen auf den rotirenden Scheiben, so verwischt sich bei grösserer Geschwindigkeit die Erscheinung immer mehr, und es bleiben nur noch die gewässerten Flecke als letzter Rest zurück, die schon vorher beschrieben sind. Zur Zeit, wo das Flimmern am heftigsten ist, verschwindet bei recht starrem Hinblicken zuweilen die ganze Figur und es wird anscheinend hinter ihr ein dunkelrother Grund sichtbar, in welchem eine grosse Menge in einander verschlungener Strömungen vorhanden zu sein scheint, eine Erscheinung, in der VIERORDT [1] den Blutlauf der Netzhautgefässe zu erkennen glaubt. In meinen eigenen Augen entspricht das Bild dieser Bewegung mehr uferlosen Strömungen, die fortdauernd ihr Bett wechseln, und sich hin und her schieben. Man könnte allerdings daran denken, dass die intermittirende Beleuchtung die Bewegung der Blutkörperchen sichtbar mache, ebenso wie man dadurch die Bewegungen und Formen der Tropfen eines ausfliessenden Strahls sichtbar macht. Aber was ich selbst davon gesehen habe, würde ich nicht wagen für Blutbewegung zu erklären.

Lässt man auf den flimmernden Scheiben farbiges Licht mit Schwarz wechseln, indem man entweder auf den Scheiben farbige Sectoren anbringt, oder die schwarzweissen Scheiben durch farbige Gläser betrachtet, so zeigen auch unter diesen Umständen selbst homogene Farben Spuren von farbigem Abklingen. Sieht man z. B. durch ein rothes Glas, welches keine andere Farbe als Roth hindurchlässt, so erscheint der vorausgehende Rand der hellen Felder orange, der nachfolgende rosaroth, entsprechend dem gelb und blau im weissen Licht. Der schwarze Grund überzieht sich gleichzeitig mit complementärem Grün. Noch deutlicher wird die Complementärfarbe [2], wenn man von den Spiralbändern das eine farbig, das andere grau macht, die Scheibe eine Weile laufen lässt und dann plötzlich anhält, oder auch wenn man mit einer Scheibe mit abwechselnd farbigen und weissen oder grauen Sectoren ebenso verfährt. SINSTEDEN [3] brauchte zu demselben Zwecke eine orangerothe Scheibe mit ausgeschnittenen Sectoren, die über einer weissen, beschatteten lief. Wenn er die obere anhielt, erschien die untere lebhaft blau.

Aehnliche Erscheinungen erhielt auch E. BRÜCKE, indem er eine kleine schwarze Scheibe vor einer farbigen Glastafel in schwingende Bewegung setzte. Namentlich auffallend war dabei die Erscheinung vor einer grünen Scheibe, indem die Stellen, vor denen Hell und Dunkel wechselte, rosaroth erschienen, die ganz bedeckten und ganz unbedeckten dagegen grün.

---

[1] Archiv für physiol. Heilkunde. 1856. Heft II.
[2] DOVE in Pogg. Ann. LXXV. 526.
[3] Ebenda. LXXXIV. 45.

Ein eigenthümliches vielleicht hierher gehöriges Phänomen sind die sogenannten flatternden Herzen. Auf farbigen Blättern aus steifem Papier sind Figuren von einer anderen lebhaften Farbe angebracht; am besten scheinen Roth und Blau zu wirken, die Farben müssen sehr lebhaft und gesättigt sein. Wenn man die Blätter betrachtet und mit einer gewissen Geschwindigkeit hin und her bewegt, scheinen die Figuren selbst gegen das Papier sich zu verschieben, und auf diesem hin und her zu schwanken. Der Grund der Erscheinung scheint darin zu liegen, dass der Lichteindruck im Auge für die verschiedenen Farben nicht gleich schnell zu Stande kommt und vergeht, und deshalb das Blau in der von dem Blatte beschriebenen Bahn scheinbar etwas hinter dem Roth zurückbleibt. Etwas Aehnliches wird auch wahrgenommen, wenn man das Auge statt des Objects bewegt. So sahen Wheatstone [1], Brücke und E. du Bois Reymond [2] bei Gasbeleuchtung, wenn sie das Auge über rothe und grüne Tapeten hinstreifen liessen, dass das Muster sich scheinbar bewegte. Nach Brewster sieht man es auch, wenn helles Tageslicht durch ein kleines Loch in ein sonst dunkles Zimmer fällt.

Ich habe in der bisher gegebenen Darstellung mich der namentlich von Fechner durchgeführten Ansicht angeschlossen, wonach alle Erscheinungen der Nachbilder theils in einer noch fortbestehenden Reizung der Netzhaut, theils in einer verminderten Reizempfänglichkeit derselben ihren Grund finden. In der That, wenn man die bisherige Bedeutung des Begriffs Reizung und Reizempfänglichkeit festhält, müssen wir von fortbestehender Reizung sprechen, wenn ein Auge in absolutem Dunkel ein positives Nachbild sieht, und wir müssen die Reizempfänglichkeit als vermindert betrachten, wenn das Auge am Orte eines negativen Nachbilds äusseres Licht schwächer empfindet, als mit der nicht ermüdeten Netzhaut. Dass also Reizung fortbesteht und die Reizempfänglichkeit vermindert sei, ist keine Hypothese, sondern geht unmittelbar aus den Thatsachen hervor. Auch genügen diese beiden Umstände, um die bei weitem grösste Zahl der augenfälligeren und constanten Erscheinungen dieses Gebiets zu erklären, namentlich die Erscheinungen der veränderten Lichtintensität, der positiven gleichfarbigen und negativen complementären Nachbilder. Die sehr zusammengesetzten Erscheinungen des farbigen Abklingens starker oder anhaltender Lichteindrücke vollständig auf ein einfaches Schema zurückzuführen, möchte freilich vor der Hand noch schwer sein und allerlei willkührliche Annahmen nothwendig machen. Indessen lässt sich einsehen, warum diese Erscheinungen so veränderlich sein müssen. Wir kennen eben weder das Gesetz, wonach eine mehr oder weniger vorgeschrittene Ermüdung des Auges für die einzelnen Farben verschwindet, noch die Abhängigkeit, in welcher die Stärke des nachbleibenden Lichteindrucks von der Ermüdung steht. Die negativen complementären Bilder im dunkeln Gesichtsfelde sind hierbei nach Fechner's Ansicht als veränderte Empfindungsweisen der inneren Reize der Netzhaut anzusehen. Viele Physiker haben dagegen diese Bilder als Wirkungen einer neuen entgegengesetzten Thätigkeit der Netzhaut angesehen, und namentlich hat Plateau [3] diese Ansicht zu einer zusammenhängenden Theorie ausgebildet. Er wies nach, dass man dergleichen complementär gefärbte Bilder auch beim gänzlichen Mangel alles äusseren Lichtes sehen könne, und da er auf das Eigenlicht des Auges noch nicht aufmerksam geworden

[1] *Inst.* No, 582. p. 75.
[2] Die Fortschritte in der Physik im Jahre 1845, redig. von Karsten. I. 223
[3] *Ann. de Chim. et de Phys.* LIII. 386. Pogg. Ann. XXXII. 543.

war, wusste er die Erscheinung eben nicht anders als durch eine neue entgegengesetzte Thätigkeit der Netzhaut zu erklären. Da er weiter auch noch spätere Wechsel des positiven und negativen Bildes bemerkte, so stellte er den Satz auf, dass die Netzhaut nach jedem heftigen Lichteindruck erst durch eine Reihe von Oscillationen zur Ruhe käme, wobei sie abwechselnd nach einander entgegengesetzte Zustände durchlaufen sollte. Diese entgegengesetzten Zustände entsprächen der Empfindung complementärer Farben. Er brachte dies in Verbindung mit gewissen Contrasterscheinungen, die im nächsten Paragraphen näher besprochen werden sollen, und nahm auch für die räumliche Ausbreitung des Eindrucks eine Reihe solcher Oscillationen an. Dagegen ist eben zu erinnern, dass die negativen complementären Nachbilder nicht in einer activen Thätigkeit der Netzhaut bestehen, sondern im Gegentheil als Verminderungen der schon vorher bestehenden inneren Lichtempfindung sichtbar werden; und dass ferner jene Wechsel zwischen positiven und negativen Bildern, wie man bei genauer Aufmerksamkeit fast immer erkennt, von äusseren Umständen, namentlich von schwachen Aenderungen in der Beleuchtung des Augengrundes abhängen. Ich halte es für sehr misslich, diese zarten, äusserst schwankenden Erscheinungen, wie es die Nachbilder zur Zeit ihres Kampfes zwischen positiv und negativ im dunkeln Gesichtsfelde sind, bei der hoch gesteigerten Empfindlichkeit des Organs, welches lange im Dunkeln verweilt hat, wo nachweisbar kaum wahrnehmbare äussere Einflüsse die Verwandlung des Bildes herbeiführen, als Basis einer Theorie zu benutzen. Wir dürfen uns aber nicht wundern, wenn wir unter diesen Umständen noch nicht immer den Grund der eintretenden Veränderungen zu bezeichnen wissen. Uebrigens hat schon Fechner auf eine andere Schwierigkeit von Plateau's Theorie aufmerksam gemacht. Dieser muss nämlich annehmen, dass bei den Nachbildern die complementären Farben als entgegengesetzte Thätigkeiten der Netzhaut sich einander aufheben und Dunkelheit erzeugen. Wenn z. B. ein complementär gefärbtes Nachbild besteht, ist die Wahrnehmung der primären Farbe beeinträchtigt. Wenn man nach einander das Auge durch grün und roth ermüdet hat, ist das Nachbild schwarz. Wie lässt sich aber diese Behauptung vereinigen mit der Thatsache, dass die gleichzeitig von objectivem complementären Lichte hervorgebrachten Empfindungen sich zu der von Weiss vereinigen, welches heller ist als jede der beiden Farben einzeln genommen?

Brücke betrachtet die positiv complementären Nachbilder als unvereinbar mit Fechner's Theorie. Ich habe schon vorher darauf aufmerksam gemacht, dass die Färbung dieser Bilder in der That sehr weisslich ist, und nur durch den Contrast gegen die vorher gesehene primäre Farbe und den mangelnden Vergleich mit anderen Farben die complementäre Farbe so grell hervortritt. Hat man gleichzeitig zwei primäre Farben neben einander gesehen, so überzeugt man sich leicht davon, dass ihre Nachbilder in den letzten Augenblicken ihrer positiven Erscheinung nur einen geringen Hauch der complementären Farben zeigen, so dass ich glaube diese Bilder als aus einem positiven weisslichen Nachbilde und einem negativen complementären gemischt ansehen zu dürfen, und dadurch diese Erscheinung auch unter Fechner's Erklärung fügen zu können. Zu erwähnen ist noch eine räthselhafte Erscheinung, die Aubert beschreibt bei den Nachbildern von Gegenständen, die durch den elektrischen Funken beleuchtet waren. Hier sah er bei schwarzen und rothen Quadraten auf weissem Grunde scheinbar gleichzeitig mit dem überschlagenden Funken leuchtende negative Bilder. Diese fehlten aber bei weissen Quadraten auf schwarzem Grunde, zuweilen erschienen sie gegen das Urbild verschoben. Ihnen folgten erst die gleichfarbigen positiven Bilder. Von farbigen Streifen auf weissem oder schwarzem Grunde sollen die Nachbilder immer complementär gefärbt, und immer heller als der Grund gewesen sein.

Ich halte es überhaupt für gerathen, in diesem äusserst verwirrten Gebiete der mannigfaltigsten Erscheinungen eine theoretische Ansicht, die wie die FECHNER'sche bei weitem die grösste Zahl der hierher gehörigen Erscheinungen leicht erklärt, und namentlich alle diejenigen gut erklärt, welche sich durch ihre Energie, Deutlichkeit und Constanz auszeichnen, als leitenden Faden festzuhalten, selbst wenn sich auch einzelne flüchtigere Erscheinungen finden, für welche man gegenwärtig noch keine ganz genügende Erklärung geben kann, wie es die Farbenwandlungen sind, die in dem Augenblicke erfolgen, wo das Bild aus positiv in negativ übergeht und wo die entgegengesetzten Einflüsse der nachdauernden Reizung und der Ermüdung sich in einem leicht veränderlichen Gleichgewichte befinden. Für jetzt habe ich noch keine Erscheinung auffinden können, welche entschieden unvereinbar mit FECHNER's Erklärungsprincipien wäre.

Beschrieben werden die positiven und negativen Nachbilder der Fenster 1634 von PEIRESC [1]. Dann tritt der Versuch als eine Art Kunststück auf. BONACURSIUS behauptet gegen den Jesuiten ATHAN. KIRCHER [2], er könne bewirken, dass man im Finstern ebenso gut sehe, wie im Hellen, und behielt Recht, indem er KIRCHER im dunkeln Zimmer eine in einer Oeffnung des Fensters befestigte Zeichnung starr betrachten liess. Dann wurde das Zimmer ganz verdunkelt, und KIRCHER sah die Zeichnung deutlich wieder, indem er (was unnöthig war) nach einem in der Hand gehaltenen weissen Papier blickte. KIRCHER giebt die Erklärung dazu, dass das Auge das eingesogene Licht wieder ausstrahle und das vorgehaltene Papier beleuchte. MARIOTTE [3] wiederholte ähnliche Versuche. NEWTON kannte die Blendungsbilder, und soll sie für psychischer Natur erklärt haben [4], weil er die Nachbilder, welche durch Blicken nach der Sonne erzeugt waren, noch längere Zeit dadurch wieder hervorrufen konnte, dass er die Aufmerksamkeit auf sie richtete. Er wurde zu diesen Versuchen veranlasst durch eine Anfrage von LOCKE, der sie in ROB. BOYLE's Buch über die Farben erwähnt gefunden hatte. Eine vollständigere Theorie der Erscheinungen gab dann JURIN [5] im Jahre 1738, und zwar gründete er sie theils auf die Fortdauer der Reizung, theils auf die Annahme, dass beim Aufhören einer stark angeregten Empfindung von selbst eine entgegengesetzte hervorgerufen würde. Ausführliche Beschreibungen der Erscheinungen gab BUFFON [6], die dann später dem Pater SCHERFFER [7] das Material zur Begründung seiner Theorie gaben. Dieser stellte im Gegensatz zu JURIN die Ansicht auf, dass die Nachbilder — er kennt fast nur negative — durch die verminderte Empfindlichkeit der ermüdeten Netzhaut entstehen. Dasselbe Princip wendet er auch zur Erklärung der complementären Farbe an, indem er sich dabei auf NEWTON's Farbenmischungsregel stützt. Eine andere etwas willkührlich aufgeputzte Theorie dieser Erscheinungen, die aber schon an PLATEAU's Oscillationen erinnert, gab GODART [8]. Eine Menge von Beobachtungen kamen weiter hinzu durch DARWIN [9], namentlich über die farbigen Nachbilder, durch AEPINUS [10] und DE LA HIRE [11] über das farbige Abklingen des Sonnenbildes, durch GERGONNE [12], BROCKEDON [13], der sie zugleich zu einer Theorie der ästhetischen Farbenharmonie zu verwenden suchte, LEHOT [14], der namentlich auf die Erscheinungen aufmerksam machte, die bei plötzlicher Aenderung der Entfernung eines farbigen Feldes entstehen, GOETHE [15], BEER [16] über Verschwinden der Farben durch Hinstarren bei operirten Staarkranken, HIMLY

---

[1] Vita. p. 175, 296.
[2] Ars magna. p. 162.
[3] MARIOTTE. *Oeuvres.* p. 318.
[4] D. BREWSTER. NEWTON's Leben übers. von GOLDBERG. Leipzig 1833. S. 263.
[5] *Essay on distinct and ind. vis.* p. 170 in SMITH's *Optics.* Cambridge 1738.
[6] *Mém. de Paris.* 1743. p. 215.
[7] Abhandlung von den zufälligen Farben. Wien 1765. — Lateinisch vom Jahre 1761, auch im *Journal de Physique* de ROZIER. XXVI. 175 und 273. (1785)*.
[8] *Journal de Physique.* 1776. VIII. 1 und 269.
[9] *Philos. Transact.* 1786. LXXVI. 313. — Zoonomie übers. von BRANDIS. Hannover 1795. II. 387.
[10] *Journ. de Phys.* XXVI. 291. — Novi Comment. Petrop. X. 286.
[11] Bei PORTERFIELD *on the eye.* I. 343.
[12] *Journ. de Mathemat.* XXI. 291.
[13] *Quart. Journal of Sc.* N. XIV. 399: Wiener Zeitschr. VIII. 471.
[14] FECHNER. Repertorium 1832. p. 229.
[15] Farbenlehre. I. 13, 20.
[16] Das Auge oder Versuch das edelste Geschenk des Schöpfers zu erhalten. S. 1—8

und TROXLER [1], PURKINJE [2], OSANN [3], SPLITTGERBER [4], KNOCHENHAUER [5], DOVE [6] über subjective Farben an bewegten Objecten, SINSTEDEN [7], SCORESBY [8], GROVE [9] über die Wiederbelebung von Nachbildern durch abwechselnde Erhellung und Verdunkelung des Gesichtsfeldes, SÉGUIN [10] (viele und genaue Beobachtungen über Abklingen der Farben), BRÜCKE [11], AUBERT [12] über Nachbilder durch den elektrischen Funken erzeugt.

Von Versuchen zur theoretischen Zusammenfassung und Erklärung der hierher gehörigen Erscheinungen ist noch weiter zu erwähnen der Versuch von PRIEUR DE LA CÔTE D'OR [13], sie auf das Princip des Contrastes zurückzuführen, ferner die von BREWSTER aufgestellte Ansicht [14], dass die complementäre Farbe sich zugleich mit der gesehenen entwickele und diese trübe. Es liefen die entgegenstehenden Ansichten zuletzt aus in die beiden zusammenfassenden Arbeiten von PLATEAU [15] und FECHNER [16]. Der erstere brachte die Meinungen, welche entgegengesetzte Thätigkeiten der Netzhaut annehmen, in eine consequente Form, FECHNER dagegen, der mit einer ausserordentlichen Selbstaufopferung auch gleichzeitig eine grosse Reihe genauer, selbst messender Versuche in diesem Gebiete ausgeführt hat, gab zuerst eine genügende Herleitung der negativen Bilder aus dem Princip der Ermüdung. Diese beiden Arbeiten bezeichnen im Wesentlichen noch den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft. Der Begriff der Ermüdung des Auges für eine einzelne Farbe bedurfte aber noch einer näheren Definition. Die Farbentheorie von TH. YOUNG gab eine solche. Um sie zu prüfen, habe ich die Versuche über die Nachbilder der Spectralfarben ausgeführt [17], wobei ich auf die grosse Deutlichkeit der positiven Nachbilder nach momentaner Lichtwirkung aufmerksam wurde.

1634. PEIRESCII Vita. p. 175, 296.
1646. ATHAN. KIRCHER. Ars magna. p. 162.
1668. MARIOTTE. *Oeuvres.* p. 318.
1689. DE LA HIRE bei PORTERFIELD *on the eye.* I. 343.
I. NEWTON. *Experiments on ocular spectra produced by the action of the sun's light on the retina. Edinb. Journ. of Sc.* IV. 75; NEWTON'S Leben von BREWSTER übers. von GOLDBERG. Leipzig 1833. S. 263.
1738. JURIN. *Essay on distinct and indistinct vision.* p. 176. In SMITH'S *Optics.* Cambridge 1738.
1743. BUFFON. *Dissertation sur les couleurs accidentelles. Mém. de Paris.* 1743. p. 147.
1765. SCHERFFER. Abhandlung von den zufälligen Farben. Wien 1765; latein. vom Jahre 1761; übers. im *Journ. de Physique de* ROZIER. XXVI. 175 und 273.
AEPINUS de coloribus accidentalibus. Nov. Com. Acad. Petr. X. 282. *Journal de Physique.* 1776. XXVI. 291.
1776. GODART. *Journ. de Physique.* VIII. 1 und 269.
1786. DARWIN. *On the ocular spectra of light and colours. Phil. Trans.* 1786. p. 313; Zoonomie übers. von BRANDIS. Hannover 1795. II. 387.
1798. COMPARETTI. Observationes dioptricae et anatomicae de coloribus apparentibus. Patav. 1798.
1804. PRIEUR DE LA CÔTE D'OR. Bemerkungen über die Farben und einige besondere Erscheinungen derselben. *Ann. de Chim.* LIV. p. 1. Gilb. Ann. XXXI. 315.

---

1 HIMLY. Ophthalmol. Bibl. Bd. I. Stück 2. S. 1—20. Bd. II. St. 2. S. 40.
2 Beiträge. I. 72, 96.
3 Pogg. Ann. XXXVII. 288.
4 Ebenda. IL. 587.
5 Ebenda. LIII. 346.
6 Ebenda. LXXI. 112. LXXV. 524, 526.
7 Ebenda. LXXXIV. 45.
8 *Philosoph. Mag.* (4) VIII. 544. (1854.)
9 *Philosoph. Mag.* (4) III. 435—436.
10 *Ann. de Chemie et de Phys.* Sér. 3. XLI.413—431. C. R. XXXIII. 642. XXXIV. 767. XXXV. 476.
11 Denkschr. der k. k. Akad. zu Wien III: Pogg. Ann. LXXXIV. 418.
12 MOLESCHOTT. Untersuchungen zur Naturl. Bd. V. 279.
13 *Ann. de Chimie.* LIV. p. 1.
14 *Phil. Mag.* II. 89. IV. 354. — Pogg. Ann. XXIX. LXI. 138.
15 *Ann. de Chimie et de Phys.* 1833. LIII. 386; 1835. LVIII. 337; Pogg. Ann. XXXII. 543. Am vollständigsten in *Essai d'une Théorie génér. comprenant l'Ensemble des apparences visuelles, qui succèdent à la contemplation des objets colorés.* Bruxelles 1834.
16 Pogg. Ann. XXXXIV. 221, 513; XXXXV. 227; L. 193, 427.
17 Oeffentlich vorgetragen in der Sitzung der niederrheinischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde in Bonn am 3. Juli 1858 und in der Naturforscherversammlung zu Carlsruhe September 1858.

1810. v. Goethe. Zur Farbenlehre. I. 13, 20.
1817. Schulz. Ueber physiologische Farbenerscheinungen, insbesondere das phosphorische Augenlicht als Quelle derselben betrachtet. In Goethe für Naturwiss. II. 20, 38.
1819. Purkinje. Beiträge zur Physiologie der Sinne. I. 92.
1826. J. Müller. Zur vergl. Physiol. des Gesichtsinnes. Coblenz. p. 401.
1830. Lehot. *Annales des sciences d'observ. par* Saigey *et* Raspail *1830*. III. 3. Froriep's Notizen XXVIII. p. 177; Fechner Repertorium 1832. p. 229.
Gergonne in seinem *Journ. de Mathem.* XXI. 291.
1833. Brewster in *Philos. Mag.* II. 89; IV. 354. Pogg. Ann. XXIX.
Plateau. *Ann. de chim. et de phys.* LIII. 386, LVIII. 337; Pogg. Ann. XXXII. 543. Am vollständigsten in: *Essai d'une Théorie génér. comprenant l'ensemble des apparences visuelles, qui succèdent à la contemplation des objets colorés et de celles, qui accompagnent cette contemplation, c'est à dire la persistance des impressions de la rétine, les couleurs accidentelles, l'irradiation, les effets de la juxtaposition des couleurs, les ombres colorées.* Bruxelles 1834.
1836. Osann. Ueber Ergänzungsfarben. Pogg. Ann. XXXVII. 287.
1838. * G. Th. Fechner. Ueber die subjectiven Complementärfarben. Pogg. Ann. XLIV. 221—245; 513—530.
Derselbe. Scheibe zur Ergänzung subjectiver Complementärfarben. Pogg. Ann. XLV. 227.
1840. * Derselbe. Ueber die subjectiven Nachbilder und Nebenbilder. Pogg. Ann. L. 193—221, 427—465.
Splittgerber in Pogg. Ann. XL. 587.
D. Brewster in *Phil. Mag.* XXIII. 354. Pogg. Ann. LXI. 138. (Combination der verlöschenden Eindrücke mit complementären.)
1841. Knochenhauer. Ueber Blendungsbilder. LIII. 346.
1845. Wheatstone. *Sur un effet singulier de juxtaposition de certaines couleurs dans des circonstances particulières. Inst.* 1845. No. 582. p. 75.
1848. H. W. Dove. Ueber Scheiben zur Darstellung subjectiver Farben. Pogg. Ann. LXXV. 526.
Grüel. Ueber einen Apparat für subjective Farbenerscheinungen. Pogg. Ann. LXXV. 524.
H. Taylor. *On the apparent motion of the figures in certain patterns of blue and red worsted. Philos. Magaz.* XXXIII. 345; Froriep's Notizen IX. 33; *Arch. d. sc. ph. et nat.* X. 304.
1850. J. M. Seguin. *Sur les couleurs accidentelles.* C. R. XXXIII. 642. XXXIV. 767—768. XXXV 476; *Ann. de chim. et de phys.* (3) XLI. 413—431; *Phil. Mag.* (4) III. 77. Silliman J. (2) XIII. 441.
Sinsteden. Ueber einen neuen Kreisel zur Darstellung subjectiver Complementärfarben und eine eigenthümliche Erscheinung, welche die Orangefarbe dabei zeigt. Pogg. Ann. LXXXIV. 45.
E. Brücke. Untersuchungen über subjective Farben. Pogg. Ann. LXXXIV. 418. Wiener Denkschr. III. 95; *Arch. d. sc. phys. et nat.* XIX. 122.
1852. W. R. Grove. *On a mode of reviving dormant impressions on the retina. Philos. Magaz.* (4) III. 435—436; *Inst.* 1852. p. 251—252. *Arch. d. sc. phys. et nat.* XX. 227—228; *Cosmos.* I. 237—238.
Dove in Pogg. Ann. LXXXV. 402. Zur Erklärung der flatternden Herzen.
1854. J. J. Oppel. Ueber das Phänomen der flatternden Herzen. Jahresber. des Frankfurter Vereins 1853—1854. p. 50—52; Hallesche Zeitschr. für Naturwissenschaft. V. 319.
W. Scoresby. *An inquiry into some of the circumstances and principles which regulate the production of pictures on the retina of the human eye with their measure and endurance, their colours and changes. Phil. Mag.* (4) VII. 218—221; VIII. 544. *Inst.* 1854. p. 154—156; *Proc. of Roy. Soc.* VI. 380—383. VII. 117—122. Athen. 1854, 1272.
1855. S. Marianini. *Sur une manière de voir facilement les couleurs accidentelles. Arch. d. sc. phys.* XXX. 325; *Cimento.* I. 165.
1856. Seguin. *Couleurs accidentelles. Cosmos.* IX. 39.
Vierordt. Archiv für physiol. Heilk. 1856. Heft 2.
1858. Helmholtz. Ueber Nachbilder, im Bericht über die 34ste Vers. deutscher Naturf. in Carlsruhe. S. 225.
H. Aubert. Ueber das Verhalten der Nachbilder auf den peripherischen Theilen der Netzhaut, in Moleschott Unters. zur Naturlehre IV. 215.
1859. Derselbe. Ueber die durch den elektrischen Funken erzeugten Nachbilder. Ebenda. V. 279.

§. 24. Vom Contraste.

Wir haben im vorigen Paragraphen untersucht, wie nach einander gesehene Farben sich gegenseitig verändern. Es bleibt uns jetzt noch übrig zu untersuchen, welchen Einfluss verschiedene im Gesichtsfelde neben einander gleichzeitig erscheinende Helligkeiten und Farben auf einander ausüben.

Da der Erfolg einer solchen Nebeneinanderstellung meistentheils der ist, dass jeder Theil des Gesichtsfeldes neben einem helleren dunkler, neben einem dunkleren heller aussieht, und seine Farbe neben einer anderen Farbe gesehen sich mehr oder weniger der Complementärfarbe der letzteren annähert, so hat der hierin sich aussprechende Gegensatz zu dem Namen des Contrastes Veranlassung gegeben. Genauer unterscheidet Chevreul die hierher gehörigen Erscheinungen unter dem Namen des simultanen Contrastes von denjenigen, wo zwei Farben nach einander auf derselben Netzhautstelle erscheinen, welche er mit dem Namen des successiven Contrastes belegt.

Es kommen nun aber auch Fälle vor, wo die Farbe eines Theiles des Gesichtsfeldes durch Nebensetzung einer anderen Farbe so verändert wird, dass sie der letzteren selbst, nicht ihrer Complementärfarbe ähnlicher wird. Auf diese würde der Name des Contrastes nicht unmittelbar passen, wenn auch vielleicht in Wirklichkeit hier die eine Farbe durch einen Contrast gegen die Complementärfarbe der anderen verändert wird. Um nun solche Fälle durch die Bezeichnung nicht auszuschliessen, bezeichnet Brücke diejenige Farbe, welche durch die Wirkung einer im Gesichtsfelde daneben stehenden hervorgebracht wird, als die inducirte Farbe, und diejenige andere, welche die Veranlassung zur Erscheinung jener ersten giebt, als die inducirende Farbe. Dabei wollen wir, wenn das Feld, dessen Farbe verändert ist, selbst farbig ist, dessen Farbe wie früher die reagirende nennen. Indem die reagirende Farbe durch die inducirte verändert wird, entsteht die resultirende Farbe. Im Allgemeinen passen also unmittelbar unter den Begriff des Contrastes nur die gewöhnlichen Fälle, wo die inducirte Farbe der inducirenden complementär ist. Es kommen aber Fälle vor, wo die inducirte Farbe der inducirenden gleich ist.

Was zunächst die Erscheinungen des successiven Contrastes betrifft, so ergeben sich diese leicht aus dem, was im vorigen Paragraphen gesagt ist. Hat man ein Feld von der Farbe *A* und mittlerer Helligkeit angeschaut, und wendet das Auge auf ein anderes von der Farbe *B*, so ist die nachbleibende Reizung des Eindrucks *A* in der Regel nicht so gross, um auf einem zweiten Felde von mittlerer Helligkeit ein positives Nachbild zu Stande kommen zu lassen, man sieht also ein negatives Nachbild von *A* auf dem Felde *B*. Dadurch werden diejenigen Theile der Farbe *B* geschwächt, welche mit *A* gleichartig sind. Ist *B* von demselben Farbenton wie *A*, so wird es durch den Contrast weisslicher, ist es complementär, so wird es gesättigter. Liegt es auf einer oder der anderen Seite des Farbenkreises zwischen *A* und seiner Complementärfarbe, so geht es in einen benachbarten Farbenton über, der weiter von *A* entfernt, näher an seiner Complementärfarbe liegt. Uebrigens erscheint *B* desto mehr verdunkelt, je heller *A* gewesen ist. Dies wäre also das allgemeine Gesetz des successiven

Contrastes, vorausgesetzt solche Helligkeiten beider Felder, dass eben nur negative Nachbilder zu Stande kommen.

Man kann sich nun leicht davon überzeugen, dass der successive Contrast, d. h. der durch Nachbilder verursachte, auch dann eine grosse Rolle spielt, wenn man farbige Felder, die neben einander im Gesichtsfelde stehen, mit einander vergleicht. Man hat in diesen Fällen meist nur simultanen Contrast zu sehen geglaubt, weil man bisher eine gewisse Eigenthümlichkeit des menschlichen Blicks in der Lehre vom Contraste wenig beachtet hat. Bei dem gewöhnlichen bequemen Gebrauche unserer Augen pflegen wir nämlich den Fixationspunkt fortdauernd langsam im Gesichtsfelde wandern zu lassen, so dass er nach einander über die verschiedenen Theile der betrachteten Objecte hingleitet. Dieses Wandern des Blicks geschieht unwillkührlich, und wir sind so daran gewöhnt, dass es eine ausserordentliche Anstrengung und Aufmerksamkeit erfordert, auch nur 10 bis 20 Secunden lang den Blick ganz scharf auf einen bestimmten Punkt des Gesichtsfeldes zu fixiren. So wie wir das thun, treten auch sogleich ungewöhnliche Erscheinungen ein. Es entwickeln sich nämlich scharf gezeichnete negative Nachbilder der Objecte, die, so lange der Blick festgehalten wird, mit den Objecten zusammenfallen, und diese deshalb schnell undeutlich werden lassen. Deshalb tritt denn auch bald das Gefühl von Blendung und Anstrengung des Auges ein, so wie wir bei der Fixation des Gesichtspunktes beharren, der Trieb das Auge zu bewegen wird immer unwiderstehlicher und die kleinen Schwankungen seiner Stellung, welche ungeachtet unserer Anstrengung eintreten, verrathen sich dadurch, dass an den Rändern der Objecte bald rechts, bald links Theile der entstandenen negativen Nachbilder aufblitzen. Auch ist diese Wanderung des Blicks, wodurch auf sämmtlichen Theilen der Netzhaut ein fortdauernder Wechsel zwischen stärkerer und schwächerer Erregung und zwischen den verschiedenen Farben unterhalten wird, offenbar von grosser Bedeutung für die ungestörte Gesundheit und Leistungsfähigkeit des Sehnervenapparats. Denn nichts greift das Auge so an, als wenn man häufig negative Nachbilder durch langes Hinstarren nach selbst nur mässig beleuchteten Flächen entwickelt. Starke negative Nachbilder sind ja immer Zeichen hoch gesteigerter Ermüdung der Netzhaut.

Ueberlegen wir nun, was geschieht, wenn bei diesem Wandern des Blicks verschieden farbige oder verschieden helle Felder im Gesichtsfelde liegen. Wenn wir ein begrenztes farbiges Feld mit genauer Fixation des Blicks auf einen Punkt desselben betrachten, entwickelt sich ein scharf begrenztes Nachbild, welches deshalb eben leicht zu erkennen ist. Wenn wir hinter einander zwei verschiedene Punkte des Objects eine Zeit lang fixirt haben, bilden sich zwei gut begrenzte Nachbilder aus, die sich zum Theil decken, aber schon nicht mehr so leicht, ohne besondere Aufmerksamkeit als Abbilder des Objects erkannt werden. Ist aber der Blick langsam über den Gegenstand hingegangen, ohne irgendwo anzuhalten, so ist das Nachbild natürlich nur ein verwaschener Fleck, und wird, obgleich es für den aufmerksamen Beobachter wirklich da ist, schon nicht mehr so leicht erkannt. Geht nun der Blick auf ein anderes benachbartes Feld von anderer Farbe über, so wird diese Farbe natürlich durch den Einfluss

des Nachbildes verändert, gerade so als hätten wir nach einander in demselben Theile des Gesichtsfeldes diese verschiedenen Farben gehabt. Wir haben also in einem solchen Falle nicht simultanen Contrast, oder wenigstens diesen nicht allein, sondern wir haben auch hier successiven Contrast, und die Erscheinungen sind ganz oder grossentheils identisch mit den im vorigen Paragraphen beschriebenen. Um allein simultanen Contrast zu haben, müssen wir nothwendig besonders dafür sorgen, dass während des Versuchs der Blick ganz streng fixirt sei.

Wir werden die Erscheinungen des reinen simultanen Contrastes, welche bei strenger Fixation des Blicks bestehen bleiben, später genauer untersuchen. Zunächst will ich noch die Erscheinungen beschreiben, die zum Theil dem simultanen Contraste, grösstentheils aber dem successiven angehören, wie sie bei dem gewöhnlichen unbefangenen Gebrauche des Auges sich zeigen. Die Farbenänderungen, welche dabei eintreten, sind genau dieselben, welche ich schon für den reinen successiven Contrast beschrieben habe. Sie sind im Allgemeinen viel deutlicher und auffallender als die des reinen simultanen Contrastes, und wo beide verschiedene Resultate herbeiführen könnten, überwiegen bei dem unbefangenen Gebrauche des Auges stets die des successiven Contrastes; wo beide die gleichen Wirkungen hervorbringen, werden die Farbenveränderungen stets viel bedeutender, wenn man von der Fixation des Blicks zur Wanderung desselben übergeht.

Im Allgemeinen ist es vortheilhaft für die Contrastwirkungen, wenn die inducirende Farbe lichtstärker ist, als die reagirende, weil dann die Nachbilder jener lebhafter und anhaltender sind. Legt man also z. B. auf einen farbigen Papierbogen einen kleinen Kreis von weissem Papier, so wird dies Weiss complementär gefärbt. Die Färbung ist aber auffallender, wenn man statt Weiss Grau nimmt, oder selbst Schwarz, da alles Schwarz bei diesen subjectiven Versuchen als ein dunkles Grau zu betrachten ist. Doch ist ein mittleres Grau in der Regel vortheilhafter für den Versuch als Schwarz. Die Contrastwirkung kann in solchen Fällen so weit gehen, dass eine ziemlich lebhafte Farbe in die complementäre umgekehrt wird. Legt man z. B. auf eine rothe Glasscheibe ein kleines Stück orangerothes Papier (mit Mennige gefärbt) und hält dies gegen den hellen Himmel, so erscheint das röthliche Papier lebhaft grünblau, in der Complementärfarbe des rothen Glases, die nahehin auch seine eigene ist.

Ferner ist es vortheilhaft, wenn die inducirende Farbe einen grossen Theil des Gesichtsfeldes bedeckt, weil dann die verschiedenen Netzhautstellen häufig und anhaltend von dieser Farbe getroffen und durch sie ermüdet werden. Die Contrastfarben sind deshalb besonders lebhaft, wenn die reagirende Farbe ein kleines Feld einnimmt, welches rings umgeben ist von einem ausgedehnten Grunde, der mit der inducirenden Farbe gefüllt ist. In diesem Falle wird hauptsächlich nur die Farbe des kleinen Feldes verändert, nicht die des grossen. Aber die Contrastwirkungen fehlen auch nicht, wenn die beiden Felder gleich gross sind, dann ist der Einfluss ein gegenseitiger, und die Farbe eines jeden von beiden wird durch die Farbe des anderen geändert.

Endlich ist die Contrastwirkung desto grösser, je näher das inducirende Feld dem reagirenden im Gesichtsfelde liegt, weil, wenn der Blick von dem einen zum anderen Felde hinübergleitet, das Nachbild desto stärker entwickelt ist, je schneller er das andere Feld trifft. Dies zeigt sich sehr deutlich bei der Anordnung, welche Chevreul für seine Versuche gewählt hat. Er schneidet von jeder der beiden Farben z. B. Gelb und Roth zwei Streifen zurecht, legt dann einen gelben und einen rothen Streifen dicht neben einander. Diese wollen wir bezeichnen mit G_1 und R_1. Dann legt er neben den gelben Streifen G_1 in kurzem Abstande einen zweiten gelben G_2 und ebenso neben den rothen R_1 einen zweiten R_2. Die Contrastwirkung macht sich dann nur an den beiden mittleren Streifen G_1 und R_1 merklich. Das Gelb von G_1 wird grünlich, indem es sich dem zu R_1 complementären Blaugrün nähert, und R_1 erscheint purpurn, indem sich etwas Indigblau, die Complementärfarbe von G_1, zumischt. Dagegen erscheinen die beiden seitlichen Streifen G_2 und R_2 in unveränderter Färbung, und man hat dadurch gute Gelegenheit, die Contrastwirkung zu erkennen. Eben davon hängt es nun auch ab, dass, wenn etwas breitere Felder an einander stossen, die Contrastfärbung namentlich an den Rändern hervortritt. Jedes Mal, wo der Blick von dem einen Felde A auf das andere B hinübergleitet, sind diejenigen Theile der Netzhaut, welche eben das Feld A verlassen, am meisten durch die Farbe A ermüdet, auf diese fällt nun das Bild der Randtheile von B. Weniger ermüdet sind diejenigen Netzhauttheile, welche etwas früher A verlassen haben, und schon weiter in das Feld B hineingerückt sind. Diesen erscheint deshalb die inducirte Farbe schwächer. So folgt, dass jedes Mal, wo der Blick zum Felde B übergeht, die Randtheile von B am meisten durch den Contrast verändert sind, die weiter vom Rande entfernten Theile im Verhältniss ihrer Entfernung weniger. Stösst also z. B. ein grünes und ein blaues Feld aneinander, so erscheint der Rand des Grün etwas gelblicher als die Mitte, der Rand des Blau etwas violetter als seine Mitte, weil dort das dem Blau complementäre Gelb sich zumischt, hier das dem Grün complementäre Purpurroth. Man kann das Spiel der Nachbilder am Rande solcher Flächen sehr gut beobachten, wenn man sich eine Reihe von Fixationspunkten bezeichnet, und den Blick nur springend bewegt, indem man ihn eine kurze Zeit auf jedem Fixationspunkte festhält. Dann sieht man deutlich die wohlbegrenzten Nachbilder sich auf das andere Feld hinüberschieben. Die älteren, weiter vorgeschobenen sind blasser, die neusten, welche dem Rande am nächsten bleiben, sind stärker.

Handelt es sich nicht um Unterschiede der Farbe, sondern der Helligkeit, so findet man, dass die Helligkeit des reagirenden Feldes neben einem helleren inducirenden vermindert erscheint, neben einem dunkleren dagegen vergrössert.

Uebrigens wird bei diesen Versuchen das Hervortreten der Complementärfarbe noch durch andere Umstände begünstigt, gegenüber den Methoden, negative Nachbilder zu sehen, welche im vorigen Paragraphen beschrieben sind. Während nämlich im Allgemeinen nöthig ist, ein farbiges Object absichtlich mehrere Secunden zu fixiren, um ein deutliches Nachbild von einiger Dauer nachher auf einem gleichmässig gefärbten Grunde zu erhalten, so zeigt es sich bei den Versuchen über Contrast, dass nur eine ziemlich flüchtige Betrachtung der einen

Farbe genügt, um die complementäre Farbe auf dem anderen Felde zu induciren, und dass diese complementäre Farbe nachher viel dauernder ist, als es ein unter gleichen Umständen gewonnenes Nachbild sein würde. Um auf einem gleichmässig gefärbten Grunde ein Nachbild zu erkennen, muss dieses gut entwickelt und gut begrenzt sein. Es bewegt sich mit dem Blicke hin und her, giebt sich dadurch gleich als eine subjective Erscheinung zu erkennen, und wir sind für gewöhnlich daran gewöhnt, unsere Aufmerksamkeit nur den objectiven Gesichtserscheinungen zuzuwenden. Wenn dagegen ein verwaschenes Nachbild ein kleineres gefärbtes Feld bedeckt, welches seine objective Begrenzung hat, und immer unter dem Einfluss des Nachbildes erscheint, so kann dieser Einfluss nicht unmittelbar in der Anschauung von den übrigen objectiven Erscheinungen des Gesichtsfeldes getrennt werden, und wird deshalb viel leichter ein Gegenstand unserer Aufmerksamkeit. Im dritten Abschnitte werden wir die hier erwähnte Eigenthümlichkeit unserer Aufmerksamkeit näher zu besprechen haben.

Dazu kommt, dass die Ermüdung der Netzhaut bei den hier betrachteten Contrasterscheinungen immer wieder erneuert wird, und die Wirkung deshalb anhaltend ist, während sie bei den meisten Methoden Nachbilder zu erzeugen ziemlich schnell vergeht.

Wir wenden uns nun zu den Erscheinungen des reinen simultanen Contrastes. Um diese als solche sicher erkennen zu können, muss bei der Anordnung der Versuche dafür gesorgt werden, dass keine Nachbilder entstehen können, dass der Theil der Netzhaut, welcher die inducirte Farbe empfinden soll, vorher auch nicht vorübergehend von dem Bilde des inducirenden Feldes getroffen wird. Vollständig kann dies in der Regel nur erreicht werden, wenn man die inducirende Farbe erst sichtbar macht, nachdem sich das Auge auf einen bestimmten Punkt des inducirten Feldes festgeheftet hat. Diesen Punkt muss es dann auch während der ganzen Dauer des Versuchs festhalten. Ist die inducirende Farbe nicht zu lichtstark oder zu gesättigt, so genügt es auch, die Augen, welche auf dunkeln wenig gefärbten Gegenständen herumgewandert sind, oder geschlossen waren, schnell auf das inducirte Feld zu richten, und dann einen Punkt von diesem festzuhalten, ohne vorher den Blick auf dem inducirenden verweilen zu lassen. Diese letztere Methode genügt namentlich deshalb in den meisten Fällen, weil die hierher gehörigen Contrasterscheinungen sich gerade bei schwachen Farbenunterschieden des inducirenden und inducirten Feldes am deutlichsten zeigen, während umgekehrt die Erscheinungen des successiven Contrastes durch starke Gegensätze der Farbe und Beleuchtung begünstigt werden.

Die hierher gehörigen Erscheinungen scheinen mir von ganz anderer Art zu sein, als die bisher betrachteten. Sie lassen sich im Allgemeinen charakterisiren als Fälle, in denen eine genaue Beurtheilung der reagirenden Farbe durch Vergleichung mit anderen als der inducirenden nicht möglich ist. In solchen Fällen sind wir geneigt, diejenigen Unterschiede, welche in der Anschauung deutlich und sicher wahrzunehmen sind, für grösser zu halten als solche, welche entweder in der Anschauung nur unsicher heraustreten, oder mit Hülfe der Erinnerung beurtheilt werden müssen. Es ist dies wohl ein all-

gemeines Gesetz bei allen unseren Wahrnehmungen. Ein Mensch mittlerer Grösse neben einem sehr grossen sieht klein aus, weil wir im Augenblick deutlich sehen, dass es grössere Menschen giebt, aber nicht, dass es auch kleinere Menschen giebt. Derselbe Mensch mittlerer Grösse, neben einen kleinen gestellt, wird gross aussehen.

Zwei Farben oder zwei Helligkeiten werden nun am sichersten verglichen, wenn sie im Gesichtsfelde ganz dicht an einander grenzen, und ihre Grenze eben durch nichts weiter als ihren Unterschied bezeichnet ist. Je weiter sie von einander getrennt sind, desto schwerer ihre Vergleichung; noch schwerer, wenn die eine nur aus der Erinnerung gegeben werden kann. Daraus ergiebt sich nun schon, dass wenn ein farbiges Feld, nämlich das reagirende, von einem anderen, dem inducirenden, rings umschlossen wird, der Unterschied der Farbe des reagirenden Feldes von der des inducirenden deutlicher wahrgenommen wird, als der des reagirenden Feldes von andern entfernt liegenden Farben. Am schwierigsten wird letztere Vergleichung, wenn das inducirende Feld das ganze Gesichtsfeld oder wenigstens seinen grössten Theil einnimmt, und deshalb andere Farben nur durch die peripherischen Theile der Netzhaut mit unvollkommener Unterscheidungsfähigkeit der Farben empfunden werden, oder nur durch die Erinnerung gegeben sind. Im Allgemeinen wird deshalb der oben gegebenen Regel gemäss der Unterschied des reagirenden Feldes von dem inducirenden verhältnissmässig zu gross erscheinen im Verhältniss zu den Unterschieden zwischen dem reagirenden Felde und anderen Farben, und zwar wird die Wirkung desto entschiedener werden, je mehr die inducirende Farbe alle anderen aus dem Gesichtsfelde ausschliesst.

Es sind ferner Täuschungen in der Beurtheilung kleiner Unterschiede leichter möglich, als bei grossen Unterschieden; dem entsprechend sind die Contrasterscheinungen auch bei kleinen Unterschieden der Beleuchtung verhältnissmässig deutlicher als bei grossen.

Endlich erscheint ein Unterschied, welcher die einzige Ursache der Trennung benachbarter Flächen ist, grösser, als wenn er einer unter mehreren ist; daher im Allgemeinen der simultane Contrast lebhafter ist, wenn das inducirte vom inducirenden Felde durch nichts anderes als den Farbenunterschied getrennt ist.

Zu bemerken ist übrigens noch, dass man die Fixation der Objecte nicht zu lange fortsetzen darf. Bei lang anhaltender Fixation tritt durch die Ermüdung des Auges eine Reihe von Erscheinungen auf, die zum Theil den entgegengesetzten Erfolg, als der ursprüngliche Contrast, herbeiführen.

Ich gehe jetzt über zur Beschreibung der einzelnen Fälle; der günstigste unter allen für die Lebhaftigkeit des Contrastes ist der der sogenannten farbigen Schatten, weil hier meistens die drei genannten Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind. Die farbigen Schatten haben deshalb auch unter allen Contrasterscheinungen zuerst und am meisten die Aufmerksamkeit auf sich gezogen.

Die leichteste Art, sie zu beobachten, ist die, dass man ein Blatt Papier von entgegengesetzten Seiten her gleichzeitig mit abgeschwächtem Tageslicht und mit Kerzenlicht beleuchtet. Das Tageslicht, d. h. weisses Licht, welches vom bewölkten Himmel, oder von einer von der Sonne beschienenen weissen

Fläche, oder auch vom Monde kommt, lasse man durch eine nicht zu breite Oeffnung einfallen, damit es deutliche Schatten werfen könne. Dann stelle man auf das Papier irgend einen Körper (Finger, Bleistift), welcher Schatten wirft. Man wird zwei Schatten erkennen. Ich nenne Schatten des Tageslichts denjenigen, welcher auch, wenn die Kerze fehlte, da sein würde, und Schatten des Kerzenlichts denjenigen, dessen Dasein von der Anwesenheit der Kerze abhängt. Der Schatten des Tageslichts ist beleuchtet von rothgelbem Kerzenlicht, aber nicht von Tageslicht. Er erscheint in seiner objectiven Färbung, nämlich rothgelb. Der Schatten des Kerzenlichts wird von dem weissen Tageslichte, nicht aber von dem rothgelben Kerzenlichte beleuchtet. Er ist also objectiv weiss, erscheint aber blau, complementär zur Farbe des Grundes, welche ein weissliches Rothgelb ist, da die nicht beschatteten Theile des Papiers gleichzeitig von dem weissen Tageslichte und dem rothgelben Kerzenlichte beschienen sind. Die Färbungen sind am deutlichsten, wenn man die Stärke beider Lichtquellen so abgleicht, dass die Schatten beider gleich dunkel sind.

Das Blau im Schatten des Kerzenlichts wird lebhafter, wenn man den Blick häufig über den rothgelben Grund wandern lässt, aber es entsteht auch ganz ohne Vermittelung von Nachbildern. Man merke und bezeichne sich irgend einen Punkt a, der in dem blauen Schatten liegt, setze vor die Kerze einen undurchsichtigen Schirm, lasse eine Weile nur Tageslicht auf das Papier fallen, bis die Nachwirkung des rothgelben Lichts vollständig erloschen ist, und das Tageslicht wieder vollkommen weiss erscheint. Nun fixire man den Punkt a und ziehe den Schirm vor der Kerze weg. Sogleich färbt sich nun der Schatten des Kerzenlichts blau, und bleibt blau, wenn auch nicht die kleinste Schwankung des Blicks erfolgt ist. Ferner tritt auch die Contrastfarbe im Schatten sogleich auf, wenn man die Augen eine Weile schliesst und bedeckt, und sie dann plötzlich öffnend nach den Schatten hinwendet.

Man nehme eine innen geschwärzte Röhre, und gebe ihr eine solche Stellung, dass, wenn man hindurchsieht, das Auge nur Stellen des Papiers erblickt, welche im Schatten des Kerzenlichts liegen. Lässt man nun zuerst nur Tageslicht einfallen, blickt dann durch die Röhre, und lässt alsdann auch das Kerzenlicht einfallen, so sieht der Beobachter nichts von den mit Kerzenlicht beleuchteten Stellen, er bemerkt dessen Anwesenheit gar nicht, und das Aussehen der Stelle des Papiers, welche er durch die Röhre sieht, bleibt unverändert. Es folgt daraus, was hier bemerkt werden mag, da es von Osann bezweifelt wurde, dass objectiv die Farbe des Papiers im Schatten des Kerzenlichts nicht verändert wird.

Wenn man dagegen die schwarze Röhre, indem man hindurchsieht, so richtet, dass ein Theil des Feldes, welches man überblickt, von dem rothgelben Lichte der Kerze erleuchtet wird, so wird der Schatten des Kerzenlichts blau. Hat sich das Blau recht intensiv entwickelt, so richte man die Röhre wieder so, dass nichts als dies subjective Blau im Gesichtsfelde ist. Jetzt bleibt das Blau bestehen, mag man nun dem Kerzenlicht Zutritt zu dem Rest des Papiers geben, oder die Kerze bedecken, was für den Beobachter natürlich einerlei ist, da er unter diesen Umständen nichts davon wahrnimmt. Die blaue Farbe ist

in solchem Falle so beständig, dass Osann aus ähnlichen Versuchen eben geschlossen hat, sie sei objectiv. Diese Annahme widerlegt sich auch hier leicht dadurch, dass die blaue Farbe ja auch bestehen bleibt, wenn man die Kerze auslöscht. In dem Augenblicke aber, wo man die schwarze Röhre vom Auge wegnimmt, schwindet auch das subjective Blau, da man es nun als identisch erkennt mit dem Weiss, welches das übrige Gesichtsfeld füllt. Kein Versuch zeigt schlagender und deutlicher den Einfluss des Urtheils auf unsere Farbenbestimmungen. Nachdem einmal in Folge des Contrastes, sei er nun successiv oder simultan, sich das Urtheil festgestellt hat, dass die Farbe im Schatten des Kerzenlichts blau sei, bleibt die Farbe scheinbar blau, wenn auch die Umstände, welche jene Bestimmung herbeigeführt haben, wegfallen, bis wir durch Wegnahme der schwarzen Röhre eine neue Vergleichung mit anderen Farben möglich machen, und durch neue Thatsachen unser Urtheil anders bestimmen lassen.

Statt der rothgelben natürlichen Farbe des Kerzenlichts kann man nun auch andere Farben anwenden. Das Kerzenlicht kann man färben, indem man farbige Gläser vor die Kerze setzt, und so gefärbtes Kerzenlicht entweder mit Tageslicht oder mit ungefärbtem Kerzenlicht combinirt. Am glänzendsten werden die Erscheinungen aber, wenn man die Versuche in einem dunkeln Zimmer anstellt, und durch eine Oeffnung des Ladens, die mit einem farbigen Glase gedeckt ist, gefärbtes Sonnenlicht eintreten lässt, durch eine andere kleine Oeffnung weisses Tageslicht. In allen diesen Fällen erscheint das weisse Licht sowohl bei fixirtem, wie bei wanderndem Blick, complementär zu dem farbigen gefärbt.

Die complementäre Farbe erscheint bei wanderndem Blicke sogar auch auf ganz schwarzen Flächen und auf Flächen, die schwach mit der herrschenden Farbe beleuchtet sind. Bei fixirtem Blicke erscheint eine dunkle Fläche bald complementär, bald gleichfarbig. Bei schwächerem Lichte gewöhnlich ersteres, bei stärkerem Lichte letzteres, jedenfalls wird sie aber nach einiger Dauer der Fixation gleichfarbig dem herrschenden Lichte, während nur an den Rändern bei den unvermeidlichen kleinen Schwankungen der Gesichtsaxe hin und wieder die Complementärfarbe aufblitzt. So wie man den Blick wandern lässt, kommt die Complementärfarbe immer zu Stande, oder wird glänzender, wenn sie schwach schon vorher da war.

Die Complementärfarbe kommt sogar dann zum Vorschein, wenn man das Licht durch zwei Gläser von derselben Farbe gehen lässt, wovon aber das eine schwächer gefärbt ist als das andere, oder wenn man zwei gleiche Gläser anwendet, aber neben dem einen noch weisses Licht einfallen lässt. In solchen Fällen wird also der Farbenton des weisslicheren Schatten geradezu in den entgegengesetzten verwandelt.

Dieselben Contrasterscheinungen, welche uns die farbigen Schatten bieten, treten nun stets ein, sobald der grösste Theil des Gesichtsfeldes von einer vorwiegenden Farbe ausgefüllt ist, oder wenn ein grosser Theil des Gesichtsfeldes unbeleuchtet ist, in dem beleuchteten Theile aber eine Farbe durch ihre Ausdehnung und Lichtstärke überwiegt.

Man nehme ein kleines Schnitzelchen weissen oder grauen Papiers, fasse es mit einer schmalarmigen Pincette oder befestige es an einem Drahte und halte es nahe vor ein Auge, mit dem man es fixirt, während man das andere Auge schliesst. Dann schiebe man hinter dem Papierschnitzelchen einen grossen Bogen farbigen Papiers oder eine grosse farbige Glastafel vor, so dass der grösste Theil des Gesichtsfeldes durch diese farbige Fläche eingenommen wird. So wie dies geschieht, tritt die complementäre Farbe auf dem Papierschnitzelchen hervor. Das reagirende Weiss darf im Allgemeinen nicht zu hell genommen werden. Wenn man den Versuch in einem Zimmer anstellt, wo von einer Lampe oder von einer nicht zu grossen Fensteröffnung her das Licht einfällt, kann man die Helligkeit des weissen Papiers leicht dadurch verändern, dass man das Licht mehr oder weniger senkrecht auffallen lässt, und so die passende Helligkeit auffinden. Eine mittlere Helligkeit des Weiss, welche ungefähr eben so gross ist, wie die des farbigen Grundes, ist am vortheilhaftesten. Ist das Weiss zu hell, oder andererseits zu stark beschattet, so dass es sich dem Schwarz nähert, so sind die Contrastfarben minder deutlich oder fehlen ganz. Je mehr die farbige Fläche vom Gesichtsfelde einnimmt, desto heller kann das Weiss gemacht werden. Wenn man sich mit dem Auge von den Objecten entfernt, und deren scheinbare Grösse also kleiner wird, so wird die inducirte Farbe schwächer oder schwindet ganz. Ebenso schwindet sie bei anhaltendem Fixiren, und verwandelt sich in die der inducirenden Farbe gleiche, auch desto leichter, je kleiner die scheinbare Grösse des inducirenden Feldes ist, je stärker dieses beleuchtet ist, und je dunkler das inducirte Feld ist. Lässt man das letztere aus einem schwarzen Scheibchen bestehen, und bringt dieses vor eine farbige Glasplatte, welche in einer Oeffnung des Fensterladen befestigt ist, so dass man die lichte Himmelsfläche hindurchsieht, so ist häufig von Anfang an die schwarze Scheibe mit der Farbe des Glases überzogen, vorausgesetzt, dass man Nachbilder vermeidet. Ich finde hierbei keinen Unterschied der verschiedenen Farben als den, dass die käuflichen rothen Gläser dunkler zu sein pflegen als die gelben, grünen und blauen, und daher für das Roth eine grössere Lichtstärke, z. B. die von sonnenhellen Wolken nöthig ist, um die gleiche Farbe von Anfang an zu erzeugen. Bei den blauen Gläsern, welche auch bei ziemlich dunkler Färbung die Erscheinung zeigen, könnte wohl auch die Fluorescenz der Linse und Hornhaut dazu beitragen, blaues Licht über die dunkle Scheibe zu verbreiten. Nach kurzem Fixiren tritt immer die gleiche Farbe ein, und nur am Rande des schwarzen Feldes zeigt sich der von Schwankungen der Gesichtslinie herrührende complementäre Saum.

Wenn wir zunächst von den Fällen absehen, wo die inducirte Farbe der inducirenden gleich ist, so können wir das Hauptresultat der beschriebenen Versuche auch so ausdrücken. Wenn im Gesichtsfelde eine besondere Farbe überwiegend verbreitet ist, so erscheint uns eine weisslichere Abstufung desselben Farbentons als Weiss, und wirkliches Weiss als complementär gefärbt. Es wird also der Begriff dessen, was wir Weiss nennen, dabei verändert. Nun ist die Empfindung des Weiss keine einfache Empfindung, sondern in einem bestimmten Verhältnisse zusammengesetzt aus den Empfindungen der drei Grund-

farben. Um nun in einem bestimmten Falle eine gegebene Farbe als Weiss anzuerkennen, wenn uns die Möglichkeit fehlt, sie mit anderem Weiss zu vergleichen, welches als solches anerkannt ist, müssen wir das Intensitätsverhältniss der drei darin enthaltenen Grundfarben als verändert oder unverändert wieder erkennen. Die Vergleichung der Intensität verschiedener Farbenempfindungen ist aber, wie wir in §. 21 gesehen haben, eine höchst unsichere und ungenaue Es kann also auch die darauf beruhende Bestimmung des Weiss keine sehr genaue sein, sondern es werden ziemlich bedeutende Schwankungen in dem, was wir zu verschiedenen Zeiten für Weiss halten, möglich sein, wie wir es denn auch wirklich finden.

In dieser Erklärung liegt auch zugleich der Grund, warum die Schwankungen der Vorstellung des Weiss nicht so weit gehen, dass wir eine gesättigte Farbe, z. B. das Roth der mit Kupferoxydul gefärbten Gläser, welche nur Licht vom rothen Ende des Spectrum hindurchlassen, jemals für Weiss halten sollten, selbst wenn wir uns längere Zeit in einem Raume befinden, welcher sein Licht nur durch ein solches Glas empfängt. In der That sind wir nicht im Zweifel, wenn wir sehr lichtstarkes Roth mit lichtschwachem Blau vergleichen, welche Farbe die hellere sei. Ueber grosse Unterschiede entscheiden wir sicher, nicht aber über kleine. Wenn also dem Auge homogenes Licht dargeboten wird, und die Empfindung der rothen Grundfarbe daher sehr intensiv ist, im Vergleich zu den Empfindungen der beiden anderen Grundfarben, so erkennen wir ohne Bedenken die Farbe als Roth an. Wir thun dies auch noch, wenn die Empfindung des Roth durch Ermüdung des Auges schon sehr bedeutend abgeschwächt ist. Wohl aber können wir unter solchen Umständen ein etwas weissliches, aber noch immer ziemlich gesättigtes Roth für Weiss halten, wie in dem oben beschriebenen Versuche, wo ein mennigrothes Papier vor einem stark erleuchteten rothen Glase grünlich erscheint.

Noch auf einen anderen Umstand muss ich aufmerksam machen, der in einem solchen Falle vor allzu grossen Irrthümern schützt. Es ist dies das Eigenlicht der Netzhaut, welches nach einiger Zeit bei wanderndem Blicke complementär zur herrschenden Farbe erscheint, und sich auf allen ganz dunkeln Stellen des Gesichtsfeldes merklich macht. Wenn wir anhaltend durch ein rothes Glas sehen, erscheinen bald alle ganz dunkeln Objecte lebhaft grün. Neben dem Roth wird also seine Complementärfarbe sichtbar, und wir werden dadurch gezwungen, das Roth als Roth anzuerkennen, wir können es nicht mit Weiss verwechseln. Bei herrschender weisser Beleuchtung erscheint der Nebel auf den dunkeln Stellen weiss, und wird eben deshalb nur bei genauer Aufmerksamkeit bemerkt. Selbst bei schwächer gefärbtem Licht, z. B. bei einer Lampe oder Kerze, macht sich das Eigenlicht der Netzhaut in dieser Weise bemerklich. Man braucht nur vor eine weisse von der Kerze beleuchtete Papierfläche einen schmalen schwarzen, ganz unbeleuchteten Gegenstand zu halten, und den Blick über ihn und die Papierfläche wandern zu lassen, so erkennt man bald den indigblauen Schein auf dem Schwarz, welcher dem Rothgelb des Kerzenlichts complementär ist. Weisses Papier bei Kerzenbeleuchtung erscheint ebenso gut weiss, wie bei Tageslicht. Blickt man aber durch eine innen geschwärzte Röhre,

welche nur eine kleine Oeffnung hat, nach dem Papier, und vergleicht das Aussehen des kleinen Theils der Papierfläche, den man noch sieht, mit dem dunkeln Felde, so erkennt man bald, dass jenes rothgelb ist, letzteres bläulich erscheint, während bei Tageslicht sich kein solcher Unterschied zeigt. Dies ist ein Mittel, um die Farbe der herrschenden Beleuchtung zu erkennen, selbst wenn man kein Tageslicht zur Vergleichung herbeischaffen kann. Es geht daraus auch hervor, dass die Farbe des Eigenlichts des Auges mit dem Weiss des Tageslichts übereinstimmt, und dadurch dieses Weiss für das Auge noch eine besondere Bedeutung hat und vor allen anderen weisslichen Farben berechtigt ist, den Namen des Weiss zu tragen.

Eine genaue Bestimmung des Weiss, bei verbreiteter farbiger Beleuchtung kann aus der Vergleichung mit dem Eigenlichte des Auges natürlich nicht hervorgehen, weil das letztere zu schwach ist.

Wenn wir also eine beschränkte Anzahl farbiger Objecte im Gesichtsfelde haben, so sind wir viel besser im Stande, die relativen Unterschiede der vorhandenen Farben unter einander und von ihrem Mittel zu bestimmen, als den Unterschied dieses Mittel vom Weiss. Nun ist bei der normalen Beleuchtung durch Tageslicht, und wenn wir eine grosse Mannigfaltigkeit von Objecten frei vergleichen können, das Weiss des Sonnenlichts die Mittelfarbe, von der aus wir die Abweichungen der übrigen Farben nach den verschiedenen Richtungen der Farbentafel hin beurtheilen. Ist aber eine andere Farbe A herrschend, so dass das Mittel aller gleichzeitig angeschauten Farben sich der Farbe A nähert, so sind wir geneigt, dieses Mittel als den Ausgangspunkt unserer zeitweiligen Farbenbestimmungen zu benutzen, und es mit Weiss zu identificiren.

Charakteristisch für diese Deutung der Erscheinungen scheint es mir namentlich, dass, wenn Nachbilder vermieden werden, eine sehr schwache Färbung des herrschenden Lichts schon ebenso deutliche Contrastfärbungen hervorbringt, wie eine höchst gesättigte. Das schwache Rothgelb des Kerzenlichts giebt den farbigen Schatten ein ganz intensives Blau. Ich finde nicht, dass dies Blau bei strenger Fixation lebhafter und deutlicher würde, wenn man ein intensiv gefärbtes rothgelbes Papier oder ein rothes Glas als Unterlage benutzt. So wie man aber den Blick wandern lässt, geben die letzteren gesättigten Farben allerdings auch viel gesättigtere Nachbilder als das Kerzenlicht.

Ausserordentlich schlagend zeigt sich die Wirkung schwacher Unterschiede bei einem zuerst von H. Meyer [1] angegebenen Verfahren. Man schneide ein Blatt aus feinem weissen Briefpapier und eines aus farbigem Papier, z. B. grünem, beide genau gleich gross, lege beide auf einander, so dass sie sich genau decken, und schiebe ein Schnitzelchen grauen Papiers dazwischen, welches ebenso dunkel oder dunkler als das grüne ist. Weniger gut ist schwarzes oder weisses Papier. Durch das weisse Papier schimmert das Grün und Grau der Unterlage nur ganz schwach durch, und wo das letztere liegt, erscheint jetzt ein sehr deutliches und starkes Rosaroth. Giebt man der Unterlage eine andere Färbung, so erscheint das graue Schnitzelchen immer in der Complemen-

[1] Pogg. Ann. XCV. 170.

tärfarbe durch das aufgelegte weisse scheinend. Es gelingt häufig die Verhältnisse so zu treffen, dass die complementäre Contrastfarbe deutlicher hervortritt als die schwache Farbe des Grundes. Ich finde nicht nur, dass ich in diesen Fällen die Contrastfarbe ebenso leicht sehe, wie wenn der Grund aus einer gesättigten Farbe gebildet ist, ich müsste eigentlich sagen, dass ich sie leichter sehe, denn die Versuche über die Contrastfarben von Papierschnitzelchen, unter welche ich bei strenger Fixation farbiges Papier hinschob, sind mir erst nach vielfältigen Bemühungen gelungen.

Direct vergleichen lassen sich beide Erscheinungen in folgender Weise. Man bedecke das rothe Blatt mit dem durchscheinenden weissen. Man lege auf das weisse ein Schnitzelchen undurchsichtigen weissen Papiers, welches man mit einer Pincette festhält. Man fixire letzteres aus solcher Nähe, dass es deutlich complementär gefärbt ist, aber nur ganz kurze Zeit, weil sonst durch die Nachbilder der Unterschied der Farbe schnell erlischt, und ziehe plötzlich das weisse Briefpapier weg. Nun sieht man das Schnitzelchen auf dem unbedeckten rothen Papier. Die Complementärfärbung erscheint kaum stärker als vorher, wenn man nicht zu lange gewartet hat.

In der That kann nach der gegebenen Erklärung über die Schwankungen des Begriffs des Weiss die Veränderung dieses Begriffs immer nur bis zu einer gewissen Grenze gehen. Diese Grenze wird schon bei geringer Farbensättigung des Grundes erreicht, und scheint dann, wenn nicht Nachbilder sich einmischen, nicht viel weiter gehen zu können. Andererseits ist die Art einer Farbe im Vergleich mit einer ihr sehr nahe liegenden Farbe des Grundes viel sicherer festzustellen, als wenn sie mit einer viel gesättigteren verglichen wird. Auch sind zwei Farben leichter zu vergleichen, wenn beide gleich lichtstark sind, als wenn ihre Lichtstärke sehr verschieden ist. Darin scheint mir der Grund zu liegen, warum die Contrastfärbung am zweifellosesten auftritt, wo inducirende und reagirende Farben gleich hell sind, und ihr Unterschied nicht die Lichtstärke, sondern nur die Farbe betrifft.

Dadurch scheint sich auch folgende Erscheinung zu erklären. Man halte mit der Pincette ein weisses Papierschnitzelchen über einem gleich hellen weissen Grunde, und schiebe ein farbiges Papier zwischen das Schnitzelchen und den Grund ein. Auf dem neuen farbigen Grunde, wenn dieser gross genug ist, erscheint nun das Schnitzelchen complementär gefärbt. Man lasse das farbige Papier zwei bis vier Secunden liegen, und ziehe es wieder fort, immer sorgfältig einen Punkt des weissen Schnitzelchen fixirend. In diesem Augenblicke wird das weisse Schnitzelchen ebenso deutlich und bestimmt der bisher inducirenden Farbe gleichfarbig werden, als es vorher complementär gefärbt wurde, ja in allen solchen Fällen, wo der farbige Grund nicht sehr ausgedehnt war, wird sogar jetzt die gleichartige Färbung deutlicher werden, als vorher die complementäre. In der That ist nun nach Entfernung des farbigen Papiers der weisse Grund schwach complementär gefärbt, und nahe gleich hell, wie das Papierschnitzelchen, und dadurch das Entstehen der Contrastfarbe mehr begünstigt, als durch die intensivere Färbung des früher untergeschobenen farbigen Papiers. Ebenso ist es, wenn die Unterlage und das Schnitzelchen beide schwarz sind.

Auch dann ist die gleichnamige Färbung bei Entfernung des farbigen Grundes deutlicher als bei der Unterschiebung desselben.

Natürlich verhält es sich ganz ebenso, wenn man das Papierschnitzelchen gleichzeitig mit dem farbigen Grunde entfernt, und nun die Nachbilder beider auf einen weissen oder schwarzen Grund projicirt, und es rechtfertigt sich hierdurch, dass wir im vorigen Paragraphen die Farbe des Nachbildes des Weiss in diesem Falle für eine Contrastfarbe erklärten.

Ehe wir die Fälle von Contrast verlassen, bei denen die inducirte Farbe den grössten Theil des Gesichtsfeldes einnimmt, müssen wir noch den Grund der zuweilen erscheinenden Färbung des reagirenden Feldes, welche der inducirenden gleichnamig ist, erörtern. Es kommt dies unter zwei Bedingungen vor, erstens nämlich wenn das inducirende Feld eine sehr grosse Lichtstärke hat, zweitens bei langem Fixiren desselben Punktes.

Wenn das inducirende Feld eine sehr grosse Lichtstärke hat, halte ich das Auftreten der gleichnamigen Färbung im reagirenden Felde nicht für eine subjective Erscheinung, sondern für eine Ausbreitung objectiven Lichts. Jede feste und flüssige durchsichtige Substanz, welche wir kennen, zerstreut kleine Mengen des Lichts, welches durch sie hindurchgeht, nach allen Seiten hin, und erscheint deshalb, wenn starkes Licht durch sie hingeht, selbst schwach erleuchtet. Dass dies auch mit der Hornhaut und der Krystalllinse des Auges der Fall ist, haben wir schon oben (§. 14, S. 142) erwähnt. Man denke ferner an die entoptischen Objecte des Glaskörpers, welche nothwendig das durchgehende Licht theilweis von seinem Wege ablenken müssen, man denke daran, dass Licht von den erleuchteten Stellen der Netzhaut nach den übrigen Theilen des Augengrundes hin reflectirt wird, so ergiebt sich, dass wenn eine grössere Menge Licht in das Auge eindringt, immer merkliche Mengen davon über einen grösseren oder kleineren Theil des Augengrundes ausgebreitet sein werden. Am deutlichsten zeigt sich diese Beleuchtung durch diffuses Licht bei der zweiten in §. 15 beschriebenen Methode, die Gefässe der Retina sichtbar zu machen, indem man eine Kerzenflamme unterhalb des Auges hin und her bewegt. In dem Lichtnebel, welcher hierbei den Grund des Auges ausfüllt, erscheinen die Schatten der Netzhautgefässe; die Beleuchtung ist also jedenfalls eine objective, und nicht blos eine Ausbreitung der Lichtempfindung in der Netzhaut.

Nun kann man sich bei objectiven Versuchen mit Glaslinsen leicht überzeugen, dass das diffus zerstreute Licht immer am stärksten in der Nähe des regelmässig gebrochenen Lichtbündels ist, und schwächer wird, je weiter man sich von diesem entfernt. Lässt man Sonnenlicht durch die Oeffnung eines schwarzen Schirms auf eine entfernte Linse fallen, und fängt das Bild der hellen Oeffnung auf einem weissen Schirme auf, so sieht man das helle Bildchen von einem weissen Nebelschein umgeben, der auch sichtbar wird, wenn man das Bild der hellen Oeffnung selbst dicht am Rande des Schirms vorbeigehen lässt. Jener weisse Nebelschein ist also keine im Auge entstehende Irradiation, sondern eine objective Erscheinung. Noch besser sieht man es, wenn man in den Schirm eine kleine Oeffnung macht, die man dem Bilde der hellen Oeffnung

nahe bringt, ohne sie aber damit zusammenfallen zu lassen. Blickt man durch die Oeffnung des Schirms nach der Linse, so erscheint diese desto heller erleuchtet, je näher man dem optischen Bilde der Lichtquelle kommt. Ein ganz entsprechendes Phänomen entsteht im Auge. Wenn man eine Lichtflamme vor einem sehr dunkeln Felde sieht, z. B. vor der geöffneten Thür eines ganz dunkeln Raumes, so erscheint die Flamme von einem weisslichen Nebel umgeben, der in ihrer unmittelbaren Nähe am hellsten ist. Man bemerkt diesen Lichtschein am besten, wenn man einen kleinen undurchsichtigen Körper zwischen das Auge und die Flamme bringt, so dass diese nicht mehr gesehen wird. Augenblicklich verschwindet auch der Lichtnebel vor dem Grunde, und man sieht diesen in seiner eigenthümlichen Schwärze. Ist das Licht farbig, so ist natürlich auch der zerstreute Lichtnebel von derselben Farbe. Ich glaube auch in diesem Falle nicht zweifeln zu dürfen, dass dieser Lichtnebel von der Zerstreuung objectiven Lichts herrührt, da die Vertheilung des Lichts ganz dieselbe ist, welche ein System Glaslinsen unter denselben Umständen geben würde. Aber allerdings fehlt hier der Nachweis mittels der Schatten der Netzhautgefässe, der in dem erst erwähnten Falle gegeben werden konnte. Beim blauen Lichte kommt endlich auch noch das durch Fluorescenz der Linse zerstreute weissbläuliche Licht hinzu, welches sich ebenfalls über den ganzen Grund des Auges ausbreitet. Wenn also eine grosse Menge farbigen Lichts in das Auge fällt, werden immer auch solche Theile der Netzhaut, welche Bilder dunkler Objecte empfangen, von dem herrschenden Lichte schwach beleuchtet werden, und zwar desto stärker, je näher sie den Bildern der hellen Flächen liegen. Ausserdem besteht im Bereich des dunkeln Bildes die innere Reizung der Nervenmasse, das weissliche Eigenlicht der Netzhaut. Dieses allein genommen würde im Contrast zur herrschenden Farbe dieser complementär erscheinen. Kommt aber viel der inducirenden Farbe gleichnamiges Licht hinzu, so wird dies von Anfang an den überwiegenden Eindruck machen, daher denn, wie oben bemerkt, schwarze Scheibchen vor farbigen Gläsern bei geringerer Helligkeit complementär, bei grösserer gleichfarbig erscheinen.

Der zweite Fall, wo die inducirte Farbe der inducirenden gleichartig ist, bei langer Fixation nämlich, erklärt sich aus dem, was im vorigen Paragraphen über das allmälige Erlöschen der Bilder durch lange Fixation beigebracht worden ist. Es ist schon dort bemerkt worden, dass wenn eine Stelle der Netzhaut lange Zeit hindurch von demselben Lichteindrucke getroffen wird, die Empfindung der Helligkeit immer schwächer und die Farbe immer weniger gesättigt wird. Indessen bemerken wir diese Veränderung des Eindrucks nur, wenn wir Vergleichungen mit dem Eindruck, den dasselbe Licht auf unermüdete Netzhautstellen macht, anstellen. Wir halten also dabei das Urtheil über die Farbe und Helligkeit fest, welches wir uns beim ersten Anblick gebildet haben. In der That würden wir, selbst wenn wir den Wechsel des Eindrucks bei einiger Aufmerksamkeit bemerken, ihn bald als subjective Erscheinung erkennen lernen, da er ja in jedem einzelnen Falle immer und immer wiederkehrt, und würden ihn, wie andere ähnliche subjective Erscheinungen, bald übersehen lernen.

Wenn die fixirte Fläche hellere und dunklere Theile hat, so verlöschen diese Unterschiede bei der Abschwächung des Eindrucks allmälig. Man bezeichne sich auf einer solchen Fläche einen Punkt, der als Fixationspunkt dient; übrigens ist es vortheilhaft, wenn die Grenzen zwischen hellen und dunkeln Theilen verwaschen sind, um bei kleinen Schwankungen des Auges nicht zu stark gezeichnete Nachbilder zu geben. Fixirt man scharf und fest, so verlöschen in 10 bis 20 Secunden oft recht auffallende Lichtunterschiede, und zwar in der Weise, dass anfangs die helleren Theile dunkler werden, und gleichzeitig die dunkleren heller. Auffallend ist dabei auch, dass eine grössere dunkle Masse sich häufig in einen verwaschenen dunkeln Fleck verwandelt, oder eine helle Masse in einen verwaschenen hellen Fleck, als wären die Objecte mit dünnflüssigen Farben gemalt, und diese verliefen in einander. Uebrigens ist in dieser Weise der Versuch schwer auszuführen, wegen der langen starren Fixation, und sehr anstrengend. Jeder Lidschlag, jede kleine Verrückung des Auges stellt das Bild wieder her. Viel bequemer und vollständiger gelingt er, wenn wir Objecte benutzen, die zur Netzhaut selbst eine feste Lage haben, nämlich die Netzhautgefässe. Ich habe im §. 15 die Methoden auseinandergesetzt, die Netzhautgefässe sichtbar zu machen. Das Gemeinsame dieser Methoden besteht darin, dass man den Schatten der Gefässe in eine ungewöhnliche Richtung fallen lässt, oder den Kernschatten zu verlängern sucht. Dabei ist aber auch nöthig, die Richtung des Schatten werfenden Lichts fortdauernd zu verändern, und man sieht nur diejenigen Gefässe, deren Schatten den Ort wechselt. So wie man die Lichtquelle unverrückt lässt, schwinden die Gefässstämme im Gesichtsfelde in wenigen Secunden, indem sie so hell werden wie das übrige Gesichtsfeld. Sie schwinden schneller und vollständiger, als es Bilder äusserer Gegenstände thun, bei denen die Schwierigkeit der Fixation besteht; sie schwinden um so schneller, je schwächer die Beleuchtung ist. Am längsten halten sie sich, wenn man durch eine Linse Sonnenlicht auf die äussere Seite der Sclerotika concentrirt, weil hier das Feld am hellsten ist.

Einfache Ueberlegungen zeigen übrigens leicht, dass das Verschwinden der Netzhautgefässe ganz dieselben Ursachen hat, wie das Verschwinden aller fest fixirten Bilder, und dass hierbei keineswegs irgend eine besondere Eigenthümlichkeit der hinter den Gefässen liegenden Netzhauttheile im Spiel ist. Es ist nicht zulässig anzunehmen, dass diese Stellen etwa mit einer grösseren Erregbarkeit begabt seien, als der Rest der Netzhaut, und deshalb trotz der Beschattung ebenso starke Empfindung hätten, wie die anderen. Denn wenn wir den Schatten in ungewöhnlicher Richtung entwerfen, indem wir einen Theil der Sclera durch die Pupille oder von aussen beleuchten, und zur Lichtquelle für den Augengrund machen, so verhalten sich die neu beschatteten Theile der Netzhaut genau ebenso, wie die gewöhnlich beschatteten. Auch auf jenen schwindet das Bild schnell, wenn es seinen Platz nicht wechselt, und die gewöhnlich beschatteten Theile geben sich keineswegs durch eine dauernd grössere Helligkeit zu erkennen. Vorübergehend blitzen allerdings helle Streifen neben dem Schatten auf, sobald der Schatten eine Zeit lang still gestanden hat, und dann wieder sich zu bewegen beginnt. Aber das geschieht bei seitlicher Be-

leuchtung ebenso gut, wie bei der Beleuchtung von vorn. Es zeigt sich dabei also wohl, dass die beschatteten Theile der Netzhaut ausruhen, und wenn wieder Licht auf sie fällt, dieses lebhafter empfinden. Aber die Nachwirkung der Ruhe, das negative helle Nachbild des Schattens dauert eben nicht länger als das Nachbild dunkler äusserer Objecte. Ich glaube deshalb nicht zweifeln zu dürfen, dass wir in dem schnellen Verschwinden des Gefässschattens eben nichts anderes sehen, als in dem Verschwinden jedes starr angeschauten objectiven Bildes mit mässigen Helligkeitsunterschieden, nur dass in jenem Falle die Schwierigkeiten der Fixation wegfallen.

Wenn nun dauernd eine Stelle der Netzhaut A stärker beleuchtet wird als eine andere B, so wird allerdings, weil A mehr ermüdet wird als B, der anfängliche Unterschied der Erregung bis zu einem gewissen Grade vermindert werden, und wir sehen ihn dabei allmälig auch für unsere Empfindung ganz und gar verschwinden, sei es nun, dass er wirklich zu klein wird, um wahrgenommen zu werden, oder, was mir wahrscheinlicher dünkt, weil unser Unterscheidungsvermögen für anhaltende Nervenerregungen viel unvollkommener ist, als für wechselnde Erregung. Da wir nun aber in diesen Fällen unsere Beurtheilung der Farbe nach dem ersten Eindruck festhalten, und über die allmälige Veränderung desselben wegsehen, so scheinen uns bei diesem Versuch die Flächen A und B einander ähnlicher zu werden, während ihre mittlere Helligkeit ungefähr constant erscheint. Im Allgemeinen wird die hellere A dabei dunkler, die dunklere B aber heller. Eine silbergraue Tapete zum Beispiel mit dunkler grauen Blättern, an der Kupferstiche hängen, erscheint mir bei längerem Fixiren wie mit Milch übergossen.

Sind im Gesichtsfelde verschiedene Farben, so hat deren Eindruck ebenfalls nur im ersten Augenblicke volle Lebhaftigkeit. Bei anhaltendem Fixiren werden alle Farben immer dunkler und grauer, und daher einander ähnlicher. Dass sie ähnlicher werden, bemerken wir, die Veränderung der herrschenden Farbe aber bemerken wir nicht, oder nur ungenau, so lange uns die Vergleichung mit frischen Eindrücken fehlt, und so halten wir diese meist für unverändert.

Haben wir also ein weisses Feld auf rothem Grunde fixirt, und werden die beiden Farben einander immer ähnlicher, so urtheilen wir, dass das Weiss roth werde. Dazu kommt, dass bei jedem Schwanken des Blicks an der Grenze beider Felder auf dem Weiss ein grünes Nachbild, auf dem Roth das von gesättigtem Roth aufblitzt, und durch den Contrast die Wirkung verstärkt.

Dass beide Farben sich einander nähern, zeigt sich sehr deutlich, wenn man ein kleines rothes Feld auf breitem weissen Grunde fixirt. Auch dann wird, wie Fechner bemerkt hat, das Weiss nach einiger Zeit röthlich, und zwar gleichmässig in seiner ganzen Ausdehnung. Ein zweites kleines farbiges Feld, welches weit seitlich liegt, hat keinen Einfluss auf den Gang der Erscheinung. Wählt man aber den Fixationspunkt auf der Grenze zweier kleinen verschiedenfarbigen Felder, die auf weissem Grunde liegen, so überzieht sich nach Fechner der Grund mit der Mischfarbe beider. Es zeigt sich hierbei also eine besondere Bevorzugung der Farbe, welche der gelbe Fleck empfindet, was wohl seinen Grund darin hat, dass diese am schärfsten und sichersten beurtheilt wird, während die Farbenempfindung auf den Seitentheilen der Netzhaut viel unvollkommener ist.

In den bisher betrachteten Fällen, wo wir voraussetzten, dass die inducirende Farbe den grössten Theil des Gesichtsfeldes einnimmt, oder wenigstens durch ihre Stärke und Lebhaftigkeit die anderen beherrscht, sind die Contrasterscheinungen sehr constant und deutlich, und scheinen weiter von keinen Nebenbedingungen abzuhängen. Anders ist es, wenn das Feld der inducirenden Farbe kleiner ist, so dass daneben an der Grenze des Gesichtsfeldes noch eine hinreichende Anzahl weisser und verschiedener Objecte erscheinen können. Dann sind die Contrasterscheinungen durchaus nicht mehr so constant, und hängen von manchen merkwürdigen Nebenbedingungen ab, die mir für die Theorie dieser Erscheinungen sehr wichtig zu sein scheinen. Ist ausserhalb des inducirenden und inducirten Feldes das Gesichtsfeld dunkel, so stört dies nicht so sehr. Erst wenn das Dunkel einen sehr grossen Theil des Gesichtsfeldes einnimmt, wenn man z. B. durch eine schwarze Röhre sieht, scheint das Eigenlicht der Netzhaut eine weisse Beleuchtung zu vertreten, und die Contrasterscheinungen werden unsicher.

Wenn man ein weisses, graues oder schwarzes Papierschnitzelchen auf ein farbiges Quartblatt oder Octavblatt legt, und diese etwa aus einem Fuss Entfernung betrachtet, sieht man in der Regel, genaue Fixation vorausgesetzt, nichts oder nur zweifelhafte Spuren von der Contrastfarbe. Wenn man aber, wie in dem früher beschriebenen Versuche von Meyer, das farbige Octavblatt mit einem Octavblatt dünnen Briefpapiers bedeckt, erscheint auffallender Weise die Contrastfarbe ganz deutlich und constant, trotzdem die Farbengegensätze dadurch ausserordentlich abgeschwächt werden. Auch hier ist es am vortheilhaftesten, wenn das Schnitzelchen grau ist und ungefähr dieselbe Helligkeit wie das farbige Papier besitzt.

Das farbige Papier, von dem Briefpapier bedeckt, bildet einen sehr schwach gefärbten weisslichen Grund. Wo das graue Schnitzelchen unterliegt, ist die objective Farbe des oberen Papiers rein weiss. Jetzt sollte man erwarten, dass wenn man die objectiv weisse Stelle mit einem weissen oder hellgrauen Schnitzelchen bedeckt, welches man oben auf das Briefpapier legt, dieses auch complementär zum Grunde erscheinen sollte. Aber wunderbarer Weise ist das nicht der Fall; ein solches erscheint in seiner objectiven Farbe, und ohne Contrast. Ja wenn man sich ein Schnitzelchen auswählt, welches genau dieselbe Farbe und Helligkeit hat, wie das Briefpapier über der grauen Unterlage, dies an die entsprechende Stelle des Briefpapiers hinschiebt, und nun anfängt die Farben beider Stellen genau mit einander zu vergleichen, so schwindet die Constrastwirkung auch auf der weissen Stelle des Briefpapiers, wo sie früher bestand, und diese erscheint nun weiss, so lange man das andere Schnitzelchen zur Vergleichung daneben hat. Ferner schwindet die Contrastfarbe auch, wenn man die Umrisse des unterliegenden grauen Schnitzelchen auf dem Briefpapier mit schwarzen Strichen nachzeichnet. Es bleibt also die Contrastfarbe nur so lange bestehen, als die beiden Felder durch nichts anderes von einander geschieden sind, als durch ihren Farbenunterschied. Sobald das eine Feld als ein selbständiger Körper oder durch einen bestimmt gezeichneten Umriss abgegrenzt ist, verschwindet die Wirkung oder wird wenigstens sehr viel zweifelhafter.

Zweitens gelingen die Versuche mit farbigen Schatten, auch wenn ein verhältnissmässig kleiner Theil des Gesichtsfeldes farbig beleuchtet ist, z. B. wenn man auf ein weisses Blatt senkrecht eine farbige Tafel aufsetzt, wodurch nur ein Theil des Papiers farbiges Licht erhält.

Drittens zeigt folgendes Verfahren von Ragona Scina die Contrastfarben sehr schön auch bei mässiger Ausdehnung des farbigen Feldes. Es seien *ab* und *ac* Fig. 151 zwei weisse Papierflächen, die eine horizontal liegend, die andere senkrecht, und *ad* eine farbige Glasplatte, welche gegen die beiden Papierflächen um 45° geneigt ist; *e* und *f* seien zwei schwarze Flecke. Ein Beobachter, welcher von oben bei *B* her auf den Apparat herniedersieht, erblickt die Fläche *ab* durch das gefärbte Glas hindurch, und sieht *ac* gespiegelt. Das Spiegelbild der Fläche *ac* fällt scheinbar mit der Fläche *ab* zusammen, und das Spiegelbild des schwarzen Flecks *f* liege neben dem Flecke *e*, etwa in *g*. Nun ist das Licht, welches farbige Gläser hindurchlassen, gefärbt, das was sie reflectiren, besteht theils aus rein weissem Licht, welches an der vorderen Fläche reflectirt ist, theils aus verhältnissmässig kleinen Antheilen farbigen Lichts, welches an der hinteren Fläche, oder mehrmals innerhalb der Platte reflectirt ist. Das reflectirte Licht ist also bei dunkel gefärbten Platten fast weiss, wenigstens viel schwächer gefärbt, als das durchgelassene Licht. Demnach erhält das Auge des Beobachters von dem Spiegelbild *g* des Fleckes *f* her nur durchgelassenes, also gefärbtes Licht, was von *ab* kommt, von dem hellen Grunde theils durchgelassenes farbiges, theils reflectirtes weissliches Licht, und von dem Flecke *e* her nur reflectirtes weissliches Licht. Obgleich nun dieses letztere Licht nicht ganz weiss ist, sondern immer noch Theile gefärbten Lichtes von der Farbe des Glases enthält, erscheint es doch im Contrast gegen die Farbe des Grundes complementär gefärbt, der Fleck *g* dagegen natürlich in der gesättigten Farbe des Glases. Ist also z. B. das Glas grün, so erscheint *e* rosaroth, *g* grün.

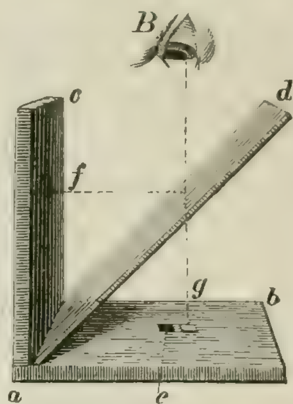


Fig. 151.

Auch hier muss man darauf sehen, dass der Unterschied zwischen der Helligkeit, in der *e* und der Grund erscheint, nicht zu gross wird, und deshalb bei farbigen Gläsern, die viel Licht durchlassen, die Fläche *ab* durch ein weisses Papier beschatten. Uebrigens ist die Contrastfarbe von *e* deutlicher, wenn der dem Grunde gleichnamig erscheinende Fleck *f* da ist, als wenn er fehlt. Beide werden hier unter scheinbar gleichen Bedingungen gesehen, und die Vergleichung ihres Aussehens steigert den Gegensatz. Sucht sich nun der Beobachter ein graues Papier aus, welches genau dieselbe Farbe hat, wie ihm der Fleck *e* ohne Contrast erscheinen würde, und bringt er davon ein Schnitzelchen über die farbige Glasplatte, so dass es ihm den Fleck *e* halb verdeckt, so erscheint ein solches Schnitzelchen gar nicht oder nur zweifelhaft complementär gefärbt, und sobald man die Farbe des Flecks *e* mit ihm vergleicht, und sie als gleich anerkennt, schwindet auch die Complementärfarbe von *e* und verwandelt sich in einfaches Grau. Es ist dies ganz dieselbe Erscheinung wie bei der ersten Methode.

Aehnliche Erscheinungen, die freilich nur sehr kleine durch Contrast gefärbte Felder, aber doch eine lebhafte und deutliche Wirkung zeigen, sind folgende. Man nehme eine schwach gefärbte etwas dicke Glasplatte etwa von gewöhnlichem grünlichen Fensterglas, und betrachte in ihr das Spiegelbild einer hellen weissen Fläche. Dabei wirft die vordere Fläche der Platte rein weisses Licht zurück, die hintere grünliches, weil letzteres der absorbirenden Wirkung des Glases ausgesetzt gewesen ist. Nun bringe man zwischen die Platte und die helle Fläche ein schmales schwarzes Stäbchen, welches in zwei Spiegelbildern erscheint, deren eines von der vorderen, eines von der hinteren Fläche der Platte reflectirt wird. Wo das von der vorderen Fläche entworfene Spiegelbild gesehen wird, empfängt das Auge des Beobachters noch grünliches Licht von der hinteren Fläche, wo das Spiegelbild der hinteren Fläche liegt, noch weisses Licht von der vorderen Fläche. Der Grund erscheint daher weiss, kaum etwas grünlich, das erstere Spiegelbild grün, das zweite durch Contrast sehr deutlich rosaroth. Noch deutlicher wird die Erscheinung, wenn man die hintere Fläche eines solchen gefärbten Glases mit Spiegelfolie belegt, und die Nachbilder unter so schiefer Incidenz betrachtet, dass beide gleich stark erscheinen.

Aehnlich ist folgender Versuch. Man lege ein farbiges, z. B. grünes, auf ein weisses Papier (besser ein graues von gleicher Helligkeit). Nahe dem Rande, wo das grüne und weisse Feld zusammenstossen, mache man auf jedes von beiden einen kleinen schwarzen Fleck, und setze ein Rhomboeder von Doppelspath auf diese Stelle. Durch den Krystall sieht man alle Punkte der Unterlage doppelt. In der Mitte erscheint ein grünweisser Streifen, wo sich das ordentliche Bild des Weiss mit dem ausserordentlichen des Grün deckt. Man muss die Anordnung so treffen, dass in diesem Streifen je eines der Bilder der beiden schwarzen Flecke erscheint. In dem ordentlichen Bilde des auf dem Weiss befindlichen schwarzen Flecks fehlt Weiss, ist aber Grün vorhanden, der Fleck ist grün. In dem ausserordentlichen Bilde des auf dem Grün befindlichen schwarzen Flecks fehlt Grün, ist aber Weiss vorhanden; durch Contrast erscheint er lebhaft rosenroth.

In den zuletzt beschriebenen Versuchen hängt die Contrastwirkung nicht mehr allein ab von einer bestimmten Vertheilung der Farben im Gesichtsfelde. Wir haben gesehen, dass diese bei zwei verschiedenen leichten Abänderungen desselben Versuchs genau gleich sein kann, und doch in dem einen Falle die Contrastwirkung eintritt, im anderen nicht. Sobald das contrastirende Feld als ein selbständiger Körper anerkannt wurde, der über dem farbigen Grunde lag, oder auch nur durch eine hinreichende Bezeichnung seiner Grenzen als ein gesondertes Feld genügend abgetheilt war, fiel der Contrast fort. Da also das Urtheil über die räumliche Lage, über die körperliche Selbständigkeit des betreffenden Objects entscheidend für die Bestimmung der Farbe ist, so folgt, dass die Contrastfarbe hier nicht durch einen Act der Empfindung, sondern durch einen Act des Urtheils entsteht. Die Art dieser Urtheilsacte, durch welche wir zur Wahrnehmung von Objecten mit bestimmten Eigenschaften gelangen, wird in der dritten Abtheilung genauer beschrieben werden. Da die bezeichneten Urtheilsacte immer unbewusst und unwillkührlich vollzogen werden so ist es

natürlich oft schwer, auszumitteln, auf welcher Verkettung von Eindrücken das endliche Resultat beruht, und es liegt in der Natur der Sache, dass sehr verschiedenartige Umstände von Einfluss sein können. Ich will versuchen hier dergleichen Umstände zu bezeichnen, so weit ich bei der Neuheit des Gegenstandes sie aufzufinden weiss.

Die bisher beschriebenen Versuche haben etwas Gemeinsames, welches den Eintritt der Contrastwirkung sehr zu unterstützen scheint, obgleich auch ohne diesen Umstand Contrast zu Stande kommen kann. In allen diesen Fällen scheint nämlich eine farbige Beleuchtung oder eine farbige durchsichtige Decke über das Feld ausgebreitet zu sein, und die Anschauung ergiebt nicht unmittelbar, dass sie auf der weissen Stelle fehlt, so dass hier nicht blos einfach an Stelle des Weiss die Complementärfarbe des Grundes gesetzt wird, dass man vielmehr an die Stelle des Weiss zwei neue Farben setzt, die Farbe des Grundes und deren Complement. Am klarsten ist das Verhältniss bei der in *Fig. 151* dargestellten Anordnung, wo man durch das unter 45° geneigte grüne Glas sieht. Man urtheilt, dass der schwarze Fleck des unteren horizontalen Blattes rosenroth sei, aber man urtheilt auch, dass man diesen Fleck wie das ganze Blatt mit seiner rosenrothen Farbe durch das grüne Glas sehe, und dass die grüne Farbe, welche das Glas giebt, sich ununterbrochen über die ganze unterliegende Fläche erstreckt, auch über den dunkeln Fleck. Man glaubt also an dieser Stelle gleichzeitig zwei Farben zu sehen, nämlich das Grün, welches man der Glasplatte zuschreibt, und das Rosenroth, welches man dem dahinter liegenden Papier zuschreibt, und beide zusammen geben in der That die wahre Farbe dieser Stelle, nämlich Weiss. In der That müsste ein Object, welches, durch ein grünes Glas gesehen, weisses Licht in das Auge sendet, wie dieser Fleck, rosenroth sein. Bringen wir aber ein genau ebenso aussehendes weisses Object oberhalb der Glasplatte an, so fällt jeder Grund weg, die Farbe des Objects in zwei zu zerlegen, es erscheint uns weiss.

Ebenso wenn farbige Flächen mit durchscheinendem Papier bedeckt sind. Ist die Unterlage grün, so erscheint das Papier selbst grünlich gefärbt. Geht nun die Substanz des Papiers ohne sichtbare Unterbrechung über das untergelegte Grau hin, so glaubt man ein Object durch das grünliche Papier hindurchschimmern zu sehen, und ein solches Object muss wiederum rosenroth sein, um weisses Licht zu geben. Ist aber die weisse Stelle als selbständiges Object abgegrenzt, fehlt die Continuität mit dem grünlichen Theil der Fläche, so betrachtet man sie als ein weisses Object, welches auf dieser Fläche liegt. Ich habe schon oben im §. 20 erwähnt, dass eine solche Trennung zweier Farben, die in demselben Theile des Gesichtsfeldes vorhanden sind, durch das Urtheil vorkomme. Wir lernten diesen Umstand dort als ein Hinderniss für das ungestörte Zustandekommen der Empfindung einer Mischfarbe kennen. Eine solche Trennung tritt sehr häufig ein, sobald die beiden Farben ungleichmässig verbreitet sind. Man glaubt dann, wie VOLKMANN [1], der diese Erscheinungen zuerst erwähnt hat, es beschreibt, die eine Farbe durch die andere hin zu

[1] MÜLLER's Archiv fur Anat. und Physiol. 1838. S. 373.

sehen. Die Fähigkeit, eine solche Trennung auszuführen, scheint mir auf folgendem Umstande zu beruhen. Ihre wichtigste Bedeutung haben die Farben für uns, insofern sie Eigenschaften der Körper sind, und als Erkennungszeichen der Körper benutzt werden können. Wir gehen deshalb bei unseren Beobachtungen mit dem Gesichtssinne stets darauf aus, uns ein Urtheil über die Körperfarben zu bilden, und dabei die Verschiedenheiten der Beleuchtung, unter der sich ein Körper uns darbietet, zu eliminiren. Ich habe in §. 20 schon erwähnt, dass wir in diesem Sinne deutlich unterscheiden zwischen einem weissen Blatte in schwacher Beleuchtung und einem grauen Blatte in starker Beleuchtung, daher wir eine gewisse Schwierigkeit finden, uns davon zu überzeugen, dass hell beleuchtetes Grau gleich sei schwach beleuchtetem Weiss. Wir müssen künstlich das starke Licht genau auf das graue Feld beschränken, so dass wir aus dem Sinneneindruck nicht entnehmen können, das Grau sei stärker beleuchtet als der Rest des Gesichtsfeldes. Erst dann erkennen wir seine Identität mit Weiss. So wie wir nun gewöhnt und geübt sind, uns ein Urtheil über Körperfarben zu bilden mit Elimination der verschiedenen Helligkeit der Beleuchtung, unter der wir sie sehen, so eliminiren wir auch die Farbe der Beleuchtung. Wir haben hinreichende Gelegenheit, dieselben Körperfarben zu untersuchen bei vollem Sonnenschein, bei dem blauen Licht des klaren Himmels, bei dem schwachen weissen Licht des bedeckten Himmels, bei dem rothgelben Licht der sinkenden Sonne, und bei dem rothgelben Licht der Kerzen. Dazu kommen noch die farbigen Reflexe der umgebenden Körper. In einem Laubwalde ist die Beleuchtung überwiegend grün, in Zimmern mit farbigen Wänden den Wänden gleichfarbig. Dieser letzteren Aenderungen der Beleuchtung werden wir uns nicht einmal deutlich bewusst, und doch kann man sie mittels der farbigen Schatten oft genug nachweisen. Indem wir die gleichen farbigen Gegenstände unter diesen verschiedenen Beleuchtungen sehen, lernen wir uns trotz der Verschiedenheit der Beleuchtung eine richtige Vorstellung von den Körperfarben zu bilden, d. h. zu beurtheilen, wie ein solcher Körper in weisser Beleuchtung aussehen würde, und weil uns nur die constant bleibende Körperfarbe interessirt, werden wir uns der einzelnen Empfindungen, auf denen unser Urtheil beruht, gar nicht bewusst.

So sind wir denn auch nicht in Verlegenheit, wenn wir einen Körper durch eine farbige Decke hindurch sehen, zu scheiden, was der Farbe der Decke und was dem Körper angehört. Dass wir in den beschriebenen Versuchen dasselbe thun, auch da, wo die Decke über dem Körper gar nicht farbig ist, verursacht, oder befördert wenigstens die Täuschung, in die wir verfallen, und vermöge deren wir dem Körper eine falsche Farbe, die Complementärfarbe des farbigen Theils der Decke zuschreiben.

Während wir aber geübt sind, in einer einfarbigen Beleuchtung die Körperfarben richtig zu erkennen, reicht unsere Uebung doch nicht zu, dasselbe zu thun, wenn zwei verschiedenfarbige Beleuchtungen von zwei verschiedenen Seiten und von eng begrenzten und scharfe Schatten werfenden Lichtquellen kommen. Denn in den meisten der oben aufgezählten Fälle farbiger Beleuchtung sind die farbigen Flächen sehr breit, und das farbige Licht ist deshalb ziemlich gleichmässig über alle Seiten der betrachteten Objecte verbreitet. Wir gewöhnen

uns deshalb, von allen farbigen Flächen ohne Unterschied, so weit sie im Bereich der farbigen Beleuchtung sind, die Farbe der Beleuchtung abzuziehen, um die Körperfarbe zu finden. Dasselbe thun wir nun bei den farbigen Schatten, wo zwei farbige Beleuchtungen sich verbinden. Kommen Kerzenlicht und Tageslicht zusammen, so ist die Beleuchtung des Grundes weisslich rothgelb. Dieses Rothgelb der Beleuchtung subtrahiren wir nun auch von der Farbe des Schattens, zu dem gar kein Kerzenlicht gelangt, und halten dieses für blau, während er weiss ist. Wie in der That sich die Anschauung bildet, dass die farbige Beleuchtung sich bei solchen farbigen Schatten und in der durchscheinenden Papierdecke auch über den objectiv weissen Fleck hinziehe, zeigt sich namentlich, wenn kleine Unregelmässigkeiten des Papiers die Beleuchtung fleckig machen; dann glaubt der Beobachter diese Fleckchen in der farbigen Beleuchtung zu sehen, die hier gar nicht existirt.

Weitere Beispiele, die sehr geeignet sind, unsere Fähigkeit zu zeigen, zwei Farben hinter einander gelegener Objecte von einander zu trennen, lasse ich hier noch folgen. Das erste schliesst sich an Volkmann's schon erwähnte Versuche an, der zwei farbige schmale Papierstreifen vor das Auge hielt, einen ganz nahe, den anderen in der Entfernung des deutlichen Sehens, und dabei bemerkte, dass er, statt die Mischfarbe zu sehen, die eine Farbe durch die andere hin sah. Man bringe einen grünen Schleier dicht vor die Augen, und lasse ihn hinreichend stark beleuchten, dass sich das ganze Gesichtsfeld mit einem grünen Scheine füllt, während das Muster und die Falten des Schleiers nur in einem sehr verwaschenen Zerstreuungsbilde erscheinen. Man wird ohne Schwierigkeit die Farben der dadurch gesehenen Gegenstände richtig erkennen, obgleich auf der Netzhaut sich zu allen Farben noch das grüne Licht des Schleiers mischt. Ja noch auffallender wird es, wenn nach einiger Zeit Ermüdung des Auges für das grüne Licht eintritt, dann färben sich nämlich die durch den Schleier gesehenen Gegenstände sogar rosenroth, trotz der Zumischung des grünen Lichts zu ihrem Netzhautbilde. Am besten zeigt sich dies, wenn wir nur mit dem rechten Auge durch den grünen Schleier sehen und das linke schliessen. Nach kurzer Zeit sieht ein weisses Papier, durch den Schleier gesehen, nicht nur weiss, sondern sogar röthlich weiss aus. Wenn wir nun das rechte Auge schliessen, das linke unbedeckte öffnen, so erscheint das Papier im Gegensatz dazu jetzt diesem Auge grün. Abwechselnd das rechte und linke Auge öffnend, sehen wir dann mit jenem, wo das Netzhautbild des Papieres grünlich-weiss ist, das Papier röthlich, mit diesem, wo das Netzhautbild weiss ist, umgekehrt das Papier grünlich.

Derselbe Erfolg tritt bei dem von Smith[1] in Fochabers angegebenen und dann von Brücke[2] veränderten und theoretisch erklärten Versuche ein. Wenn man nahe neben dem rechten Auge eine hell brennende Flamme anbringt, oder die Sonne von rechts her das Auge bescheinen lässt, aber so, dass kein Licht direct in die Pupille eindringt, während das linke Auge beschattet wird,

[1] *Edinb. Journ. of Science.* V. 52. Pogg. Ann. XXVII. 494.
[2] Denkschr. der k. k. Akad. zu Wien. III. Bd. Pogg. Ann. LXXXIV. 418.

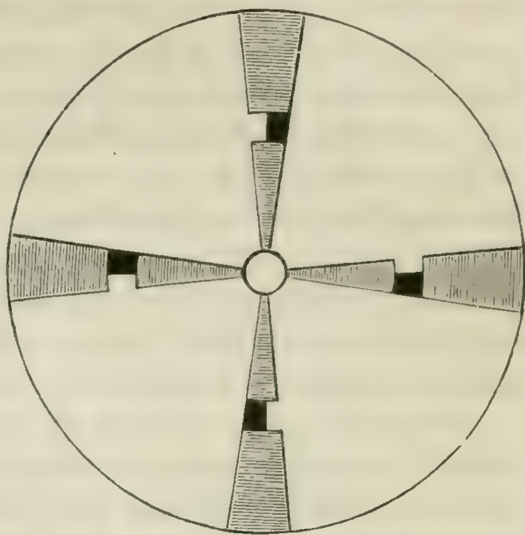
so erscheinen dem rechten Auge weisse Gegenstände grünlich, dem linken röthlich gefärbt. Man sieht dies deutlich, wenn man hinter einander bald das rechte, bald das linke Auge öffnet, oder wenn man mit beiden Augen ein weisses Blatt Papier fixirt, und in die Mitte zwischen Auge und Papier ein schwarzes verticales Stäbchen hält, welches man dann in zwei Bildern, eines dem rechten, das andere dem linken Auge angehörig, auf dem Papiere projicirt sieht. Auch dann ist das links erscheinende Bild, wo das linke Auge die Papierfläche sieht, aber nicht das rechte, roth, das andere grün. Fixirt man dagegen eine schwarze Tafel und hält in einiger Entfernung davor ein weisses Object, welches im Doppelbilde erscheint, so ist das rechte Bild roth, welches jetzt das vom linken Auge gesehene ist, das linke grün. Dem seitlich beleuchteten Auge also erscheint Weiss grünlicher als dem nicht beleuchteten Auge. Nun dringt unter diesen Umständen Licht durch die Sclera und die Augenlider in das beleuchtete Auge, und dieses Licht ist roth, wie wir aus früheren Versuchen [1] schon wissen. Lässt man Sonnenlicht seitlich auf das Auge scheinen, so erkennt man auch die rothe Farbe auf dunkeln Objecten. Betrachtet man z. B. eine Druckschrift, so erscheinen die schwarzen Buchstaben schön roth, das weisse Papier grün. Dies rothe seitlich eingedrungene Licht zerstreut sich über den grössten Theil des Augengrundes, und die Netzhautstellen des beleuchteten Auges, welche das Bild eines weissen Objects aufnehmen, werden also gleichzeitig von weissem und rothem Lichte beleuchtet, empfinden aber grünlich weiss. Die grünliche Färbung wird bei längerer Fortsetzung des Versuchs immer deutlicher, weil sie von der Ermüdung des Auges für Roth abhängt. Aber sie kann bei der überwiegend rothen Beleuchtung der Netzhaut nur dadurch zu Stande kommen, dass die schon vorher bestehende und ausgebreitete Erleuchtung des Grundes getrennt wird von dem hinzukommenden Lichte der Objecte, und das letztere grünlich erscheint, weil das Auge für roth ermüdet ist. Im Gegensatz hierzu erscheint nun im unveränderten Auge das reine Weiss röthlich.

Man betrachte ferner die Spiegelbilder der Tapeten und der Decke eines Zimmers in der gut polirten Oberfläche einer Mahagony-Tischplatte. Accommodirt man das Auge für die gespiegelten Gegenstände, so erscheinen diese entweder in natürlicher Farbe, oder auch oft etwas bläulich, complementär zur Farbe der Platte. Accommodirt man das Auge dagegen für die Platte, so sieht man, dass die Summe des Lichtes, was von ihr herkommt, ganz überwiegend rothgelb ist. Die complementäre Färbung der Spiegelbilder tritt hier, wie ich finde, namentlich dann ein, wenn das gespiegelte Licht der Objecte verhältnissmässig schwach gegen die Beleuchtung der Platte ist. Wenn dagegen bei sehr schrägem Einfall die Stärke des gespiegelten Lichts sehr zunimmt, die Holzmaserung dagegen verschwindet, so erscheinen die Spiegelbilder oft im Gegentheil röthlich, indem man dann die Trennung zu vollziehen keine Veranlassung mehr hat.

Obgleich solche Umstände, welche uns veranlassen eine Trennung des weissen Lichts in zwei Portionen zu vollziehen, den Eintritt des Contrasts sehr begünstigen, sind sie doch nicht nothwendig. Es treten nämlich ähnliche Contrast-

[1] S. oben S. 156.

erscheinungen auch auf in anderen Fällen, wo ein schwacher Unterschied der Farbe allein das inducirte Feld von dem inducirenden scheidet. Sehr schön sieht man sie auf dem Farbenkreisel, wenn man in einer Scheibe wie *Fig. 152* schmale farbige Sectoren auf weissen Grund setzt, sie aber in mittlerer Entfernung vom Mittelpunkte durch einen aus Schwarz und Weiss zusammengesetzten Streifen unterbricht, so dass beim Umdrehen eigentlich ein grauer ringförmiger Streifen auf schwach gefärbtem weisslichen Grunde entstehen sollte. In der That sieht dieser Ring aber nicht grau, sondern complementär gefärbt aus, und zwar am intensivsten, wenn er gleiche oder etwas geringere Helligkeit als der Grund hat. Ist die Breite der farbigen Sectoren gross, und dadurch die Farbe des Grundes zu intensiv, so ist die Complementärfarbe des Ringes schwächer, oder wenigstens zweifelhafter als bei schwacher Färbung des Grundes, ebenso wenn man den grauen Ring mit zwei schmalen schwarzen Kreislinien einfasst, die ihn scharf vom Grunde abgrenzen. Es fehlt in den letzteren Fällen die Contrastfärbung vielleicht nicht ganz, aber sie ist mit einer erheblichen Unsicherheit des Urtheils über die Farbe des inducirten Feldes verbunden, und durch Vergleichung mit einem neben dem Farbenkreisel befindlichen weissen Felde kann man leicht zu dem Resultate gelangen, dass das inducirte Feld wirklich weiss sei, während ohne die Kreislinien die complementäre Contrastfarbe sich mit zweifelloser Bestimmtheit der Wahrnehmung aufdrängt. Gar nichts von der Contrastfarbe sieht man dagegen an einem weissen Papierschnitzelchen, welches man mit einer Pincette über die grünliche Scheibe hinführt, selbst wenn es durch keinen Schlagschatten von dem grünlichen Felde abgehoben wird, und wenn man es so gegen das Licht wendet, dass seine Helligkeit genau gleich der des grauen Reifes wird, so erscheint auch dieser in der Nähe des Papierschnitzelchens plötzlich weiss, wie dieses, während die entfernteren Theile des Ringes meist gefärbt bleiben. Ist der graue Reif von schwarzen Linien eingefasst, so erkennt man bei diesem Versuche seine Farbe als reines Grau in seiner ganzen Ausdehnung. Man kann in diesem Falle nicht sagen, dass man die eine Farbe durch die andere hindurchsähe. Aber man geht bei der Beurtheilung der Farbe des Ringes von der Farbe des Grundes aus, und fasst die Farbe des Ringes als eine Abweichung von der Farbe des Grundes auf. Wenn die beiden Farben zwei verschiedenen Körpern angehören, ist kein Grund vorhanden, sie zu einander in Beziehung zu setzen. Man sucht vielmehr eine jede Körperfarbe unabhängig von jeder zufälligen Nebeneinanderstellung zu bestimmen. Wenn aber eine continuirliche ebene Fläche, die überall dieselbe Structur und dasselbe Material zeigt, an verschiedenen Stellen verschiedene Farben zeigt, die einzigen Unterschiede dieser Stellen also in der Färbung bestehen, so müssen nothwendig in unserem Urtheil


Fig. 152.

diese verschiedenen Farben als solche zu einander in Beziehung gesetzt und mit einander verglichen werden. Der Erfolg dieser Vergleichung ist nun, wie es der Versuch lehrt, der, dass der Unterschied der verglichenen Farben als zu gross erscheint, sei es nun, dass dieser Unterschied, wenn er der einzig bestehende ist, und allein die Aufmerksamkeit auf sich zieht, einen stärkeren Eindruck macht, als wenn er einer unter mehreren ist, und deshalb im ersteren Falle unwillkührlich für grösser gehalten wird als im zweiten, sei es, dass auch in diesem Falle die verschiedenen Farben der Fläche als Abänderungen der einen Grundfarbe der Fläche aufgefasst werden, wie sie durch darauf fallende Schatten, farbige Reflexe, oder durch Tränkung mit farbigen Flüssigkeiten, Bestäubung mit farbigen Pulvern entstehen könnten. In der That würde, um auf einer grünlichen Fläche einen objectiv weissgrauen Fleck zu erzeugen, ein röthlicher Farbstoff nöthig sein.

Es spricht sich übrigens in den schwankenden Resultaten dieser Versuche deutlich aus, wie schwer es uns ist, Helligkeit und Farbe zweier Flächen, die nicht unmittelbar und ohne Grenzlinie an einander stossen, genau mit einander zu vergleichen. Schon bei den photometrischen Methoden haben wir erörtert, dass die Vergleichung nur dann genau und sicher geschieht, wenn die Grenze zwischen den zu vergleichenden Feldern in keiner anderen Weise bezeichnet ist, als durch den Unterschied der Farbe oder Beleuchtung. Je weiter sie von einander abstehen, desto ungenauer wird die Vergleichung, so dass in einem solchen Falle dem Einfluss von Nebenumständen auf unsere Beurtheilung der Helligkeit oder Farbe ein ziemlich breiter Spielraum gelassen ist. Bei den beschriebenen Versuchen ist der Unterschied zwischen der inducirten und der inducirenden Fläche unter den günstigsten Bedingungen herausgestellt, die inducirte Fläche aber mit anderen seitlich im Gesichtsfelde liegenden Flächen nur sehr unvollkommen zu vergleichen.

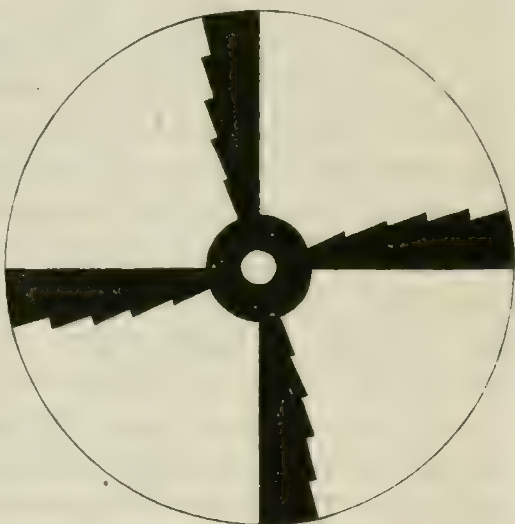
Es zeigt sich dies noch deutlicher bei den nun zu beschreibenden Versuchen, wo die inducirte Fläche an entgegengesetzten Seiten mit zwei verschiedenen Farben in Berührung tritt. Dann wird jene an den entsprechenden Rändern complementär gefärbt, oder wenn die inducirte Fläche mit einem Rande an eine dunklere, mit dem anderen an eine hellere Fläche stösst, erscheint der erstere Rand heller, der letztere dunkler. Diese Contrasterscheinungen sind aber ebenfalls nur dann deutlich, wenn das inducirende vom inducirten Felde eben nur durch den Unterschied der Farbe oder der Helligkeit geschieden ist, und keine andere Begrenzung existirt.

Man kann die Versuche leicht mit der transparenten Papierdecke ausführen. Man klebe ein Blatt grünen und rosenrothen Papiers zusammen, so dass man ein Blatt erhält, welches zur Hälfte grün, zur Hälfte rosenroth ist. Am Orte der Grenzlinie zwischen beiden Farben befestige man ein Streifchen grauen Papiers, und lege über das ganze ein ebenso grosses Blatt dünnen Briefpapiers. Es wird nun der graue Streifen, wo er an das Grün stösst, rosenroth, und wo er an Roth stösst, grün erscheinen, in seiner Mitte gehen die beiden Farben in einander über durch einen unbestimmten Farbenton, der wohl eigentlich Grau ist, aber doch nicht bestimmt von uns als solches anerkannt werden könnte. Die Er-

scheinung ist viel lebhafter, wenn die Längsrichtung des grauen Streifen quer zur Trennungslinie der Farben steht. Dann kann der Theil des Grau, welcher in das Grün hineinragt, ebenso lebhaft rosenroth erscheinen, wie der rosenrothe Grund der anderen Seite. Schwächer, aber doch deutlich erkennbar ist die Contrastfarbe, wenn die mittlere Längslinie des grauen Streifen gerade auf der Trennungslinie der Farben liegt. Dann erscheinen die Seitenränder des Grau mit einem schmalen nach der Mitte hin verwaschenen Saume der Complementärfarbe gefärbt.

Aehnliche Wirkungen erhält man, wenn man dünne Papierblätter treppenförmig über einander legt, so dass an dem einen Rande der Papierschicht nur ein Blatt hervorsieht, daran ein Streifen stösst, wo sich zwei decken, dann drei u. s. w. Lässt man Licht durch eine solche Lage von Blättern scheinen, so ist natürlich innerhalb jeder Stufe die objective Helligkeit constant, doch erscheint jede Stufe dunkler an dem Rande, wo sie an die nächst hellere anstösst, und heller, wo sie an die nächst dunklere stösst.

Viel schöner und feiner abgestuft lassen sich aber alle diese Erscheinungen auf dem Farbenkreisel hervorbringen. Man gebe den Sectoren des Farbenkreisels die nebenstehende Form der *Fig. 153*, und mache sie weiss und schwarz, so erscheinen beim Umdrehen mehrere concentrische Ringe, von denen die äusseren immer heller sind, als die nächstliegenden inneren. Innerhalb eines jeden solchen Ringes ist die Winkelbreite der schwarzen Flächenstücke constant, also auch die Helligkeit bei schnellem Umdrehen; nur von einem zum anderen Ringe wechselt die Helligkeit. Und doch erscheint jeder Ring nach innen zu, wo sich der nächst dunklere anschliesst, heller, nach aussen zu, wo sich der nächst hellere anschliesst, dunkler. Sind die Helligkeitsunterschiede der Ringe sehr klein, so sieht man zuweilen kaum, dass die inneren Ringe dunkler als die äusseren sind, es fällt vielmehr nur der periodische Wechsel von Hell zu Dunkel an den Rändern der Ringe in die Augen.


Fig. 153.

Nimmt man statt Weiss und Schwarz verschiedene Farben, so erscheint jeder Ring am äusseren und inneren Rande verschieden gefärbt, während doch objectiv die Farbe jedes einzelnen Ringes in seiner ganzen Breite dieselbe ist. Jede einzelne von den gemischten Farben tritt an demjenigen Rande jedes Ringes stärker hervor, wo ein anderer Ring anstösst, der weniger von dieser Farbe enthält. Hat man also z. B. Blau und Gelb gemischt, und überwiegt das Blau in den äusseren Ringen, Gelb in den inneren, so erscheint jeder Ring am äusseren Rande gelb, am inneren blau, und wenn die Farbenunterschiede der einzelnen Ringe überhaupt sehr gering sind, kann auch hier wieder die Täuschung eintreten, dass die wirklich vorhandenen Unterschiede der Farbe der verschiedenen Ringe verschwinden, und die abwechselnd blaue und gelbe Contrastfärbung der Ränder auf einen gleichmässig gefärbten Grund aufgetragen zu sein scheint.

Sehr bezeichnend ist es auch, dass in diesen Fällen gewöhnlich die Mischfarbe nicht zur Anschauung kommt, man vielmehr die beiden gemischten Farben getrennt neben und durch einander zu sehen glaubt.

Diese so auffallenden Contrastwirkungen verschwinden aber, wenn man die Grenze zwischen je zwei Ringen durch feine schwarze Kreislinien bezeichnet. Dann erscheint jeder Ring, wie er wirklich ist, in seiner ganzen Breite gleich hell und gleich gefärbt. Auch hier ist es wieder von entscheidendem Einflusse, dass die verschiedenen Felder Theile einer, von der Färbung abgesehen, durchaus continuirlichen und gleichartigen Fläche seien. Auch hier haben wir es also nicht mit Veränderungen der Empfindung, sondern der Beurtheilung zu thun. Die Beleuchtungsunterschiede der verschiedenen Theile dieser Fläche werden als die einzigen wahrnehmbaren Unterschiede wieder besonders hervorgehoben, und da diejenigen zweier unmittelbar benachbarter Flächenelemente deutlicher und sicherer wahrnehmbar sind, als die von entfernteren, so drängen sich namentlich die Unterschiede der Beleuchtung längs der Ränder je zweier Felder der Wahrnehmung auf, und erscheinen als die am sichersten und deutlichsten wahrnehmbaren grösser als die unsicher wahrnehmbaren zwischen je zwei mittleren Theilen zweier Felder. Da in der Mitte jedes Feldes bei den beschriebenen Versuchen kein plötzlicher Sprung der Beleuchtung existirt, welcher wahrgenommen werden könnte, so muss der Schein entstehen, dass die Farbe des einen Randes durch die Mitte des Feldes allmälig in die des anderen übergeht. Macht man aber in der Mitte des inducirten Feldes einen schwarzen Strich, oder legt man ein graues Feld, dessen Hälften ungleich hell und durch eine scharfe Grenzlinie getrennt sind, zwischen zwei farbige, so gehen die complementären Färbungen von jeder Seite her bis an diese Grenzlinie vor, und scheiden sich an dieser. Sind die Farbenunterschiede des inducirten und der inducirenden Felder so gross, dass zwischen allen Punkten derselben der Farbenunterschied zweifellos wahrnehmbar ist, so verschwindet die Contrastwirkung, oder wird wenigstens viel zweifelhafter. Findet noch irgend eine andere Abgrenzung des inducirten Feldes statt, so wird der Unterschied seiner Färbung von der des inducirenden viel unsicherer wahrgenommen, und der Contrast schwindet ebenfalls, oder wird schwächer.

Von den früheren Beobachtern ist in den theoretischen Erklärungen der Contrasterscheinungen immer vorausgesetzt worden, dass die Reactionsweise der Nerven, die Empfindung, in den inducirten Theilen der Netzhaut verändert sei, dass die Contrasterscheinungen also in gewissem Sinne in das Gebiet der Mitempfindungen gehörten, zu welchen viele Forscher auch die Irradiation rechneten. In gewissem Sinne hatte man allerdings Recht von veränderter Empfindung zu sprechen, insofern man bei den Beobachtungen den successiven Contrast nicht genau von dem simultanen getrennt hatte, und also allerdings eine Aenderung der Empfindung durch Nachbilder eintreten konnte. Ich habe hier, so viel ich weiss, die Trennung des successiven und simultanen Contrastes zuerst methodisch für alle Fälle durchzuführen gesucht, und gefunden, dass in den Fällen, wo die inducirende Farbe nicht durch ihre Ausdehnung und Lichtstärke alle anderen überwiegt, das Auftreten der Contrastfarbe von Umständen abhängt, die nur durch die psychischen Thätigkeiten, durch welche es zu Gesichtswahrnehmungen kommt, festgestellt

werden. Wenn dem inducirten Felde körperliche Selbständigkeit zugeschrieben wird, kommt es unter der genannten Bedingung meist nicht zur Wahrnehmung der Contrastfarbe. Die Art der hierbei vorkommenden Täuschung des Urtheils habe ich schon oben bezeichnet. Es handelt sich immer um Fälle, wo eine gewisse Breite des Zweifels über die Art der inducirten Farbe besteht, weil ein genauer Vergleich derselben mit Weiss nicht ausführbar ist, und wo deshalb unser Wahrnehmungsvermögen durch Nebenumstände veranlasst wird, die betreffende Farbe bald an die eine, bald an die andere Grenze des Intervalls zu verlegen, innerhalb dessen die Unsicherheit besteht. Denjenigen meiner Leser, welche den Einfluss der psychischen Thätigkeiten auf unsere Sinneswahrnehmungen noch wenig kennen, wird es vielleicht unglaublich vorkommen, dass durch psychische Thätigkeit eine Farbe im Gesichtsfelde erscheinen soll, wo keine ist; ich muss diese bitten, ihr Urtheil zu suspendiren, bis sie die Thatsachen des dritten Abschnittes dieses Werkes, der die Sinneswahrnehmungen behandeln wird, kennen gelernt haben, wo sie viele Beispiele ähnlicher Art finden werden. Es leitet uns der vorliegende Paragraph zur Lehre von den Gesichtswahrnehmungen schon hinüber. Ich habe ihn in der Lehre von den Empfindungen noch stehen lassen, weil der Contrast bisher immer dort seine Stelle fand, und die gewöhnlichsten Erscheinungen, die zu ihm gehören, gemischter Natur sind.

Da die meisten Contrasterscheinungen von der Breite der Unsicherheit in der Beurtheilung der Intensität und Qualität unserer Gesichtsempfindungen abhängig sind, so muss nothwendig Uebung in der Beurtheilung der Farben einen beträchtlichen Einfluss auf das Eintreten des Contrastes haben. So wie ein in der Beurtheilung räumlicher Grössen geübtes Auge sich vor manchen Täuschungen hüten wird, in die ein ungeübtes verfällt, wird es auch bei den Farbenbestimmungen geschehen, und ich glaube deshalb, dass geübte Augen den Contrast im Allgemeinen weniger lebhaft sehen werden, als ungeübte. Meine Versuche wurden mir von Personen, die in optischen Beobachtungen erfahren waren, leicht bestätigt. Dagegen sind in manchen Büchern die Contrasterscheinungen so beschrieben, dass ich annehmen muss, sie seien manchen Beobachtern viel leichter sichtbar und viel häufiger als mir.

Während nun die Contrasterscheinungen bei begrenztem inducirendem Felde durch die Abhängigkeit der Färbung von anderen nur durch Beurtheilung festgestellten Umständen keinen Zweifel über ihre Deutung lassen, sind die Contraste bei unbegrenztem inducirendem Felde viel constanter, und würden deshalb eher die Deutung zulassen, dass sie durch Veränderungen der Empfindung selbst hervorgerufen seien. Indessen sind offenbar bei diesen letzteren die Bedingungen noch viel ungünstiger als bei den ersten, um die empfundene Farbe des inducirten Feldes sicher bestimmen zu können, weil eben die Vergleichung der Farbe dieses Feldes mit anderem Weiss ganz fehlt, oder wenigstens viel beschränkter ist. Ausserdem zeigen die Contraste auf unbegrenztem inducirendem Felde, wenn sie auch constanter auftreten, doch in ihren Intensitätsverhältnissen eine vollständige Analogie mit denen des begrenzten Feldes. Es wird in allen diesen Fällen die Contrastfarbe in voller Intensität schon durch eine sehr kleine Intensität der inducirenden Farbe hervorgerufen, und durch Steigerung der letzteren nicht oder wenig verstärkt. Dagegen kann sie eine deutliche Verstärkung erleiden, sobald wirklich die Empfindung durch Nachbilder verändert wird. Sie wird endlich durch das Urtheil in voller Intensität festgehalten, sobald man alle anderen Farben aus dem Gesichtsfelde entfernt. Ich zweifle deshalb nicht, dass auch bei grossem inducirendem Felde die Deutung der Erscheinungen die nämliche sein müsse, wie bei kleinem, dass auch hier die Contrastfarbe nur durch eine Thätigkeit des Urtheils gesetzt

sei, wenn ich auch in diesen Fällen noch keinen so genügenden Beweis für diese Deutung liefern kann.

Die Contrasterscheinungen sind dem LEONARDO DA VINCI grossentheils schon bekannt gewesen. Er sagt, dass unter allen Farben von gleicher Vollkommenheit jene die schönsten sind, welche neben den entgegengesetzten stehen, also Weiss neben Schwarz, Blau neben Gelb, Roth neben Grün [1]. Später waren es namentlich die farbigen Schatten, welche von allen anderen Contrasterscheinungen die Aufmerksamkeit in Anspruch nahmen. OTTO v. GUERICKE [2] kannte sie, und suchte sie zu benutzen, um den Aristotelischen Satz, dass Weiss und Schwarz gemischt Blau geben könnten, zu beweisen. Aber erst BUFFON [3] lenkte die allgemeinere Aufmerksamkeit auf sie; er beobachtete sie indessen nur immer zufällig bei Sonnenaufgang oder Untergang, wo sie bald blau, bald grün waren. Abbé MAZEAS [4] erzeugte sie durch das Licht des Mondes und einer Kerze. Auch er glaubte die Farben aus einer Verminderung des Lichtes erklären zu können. Dagegen suchten MELVILLE [5] und BOUGUER [6] die Erscheinungen aus NEWTON's Farbentheorie zu erklären. Man hielt die Farben für objectiv, weil in der That die blauen Schatten, wenn sie von dem Lichte des blauen Himmels erleuchtet werden, objectiv blau gefärbt sind. Dass wirklich das blaue Licht des Himmels in vielen Fällen Grund der blauen Schatten ist, zeigte namentlich BEGUELIN [7]. RUMFORD [8] scheint zuerst die subjective Natur der Farbe des einen Schattens entdeckt zu haben, indem er ihn durch ein enges Rohr betrachtete; derselben Ansicht schlossen sich GOETHE [9], GROTTHUSS [10], BRANDES [11], TOURTUAL [12] an. Dagegen stritten noch längere Zeit andere Beobachter für die objective Natur beider Schattenfarben, so v. PAULA SCHRANK [13], der die Farbe des blauen Schattens der Diffraction zuschrieb, ZSCHOKKE [14], OSANN [15] und POHLMANN [16], welcher sich BEGUELIN's Ansicht wieder anschloss. Dagegen führte namentlich FECHNER [17] den Beweis von der subjectiven Natur dieser Erscheinungen, er wies unter anderem auch nach, wie durch eine Thätigkeit des Urtheils die einmal hervorgetretene Contrastfarbe festgehalten werden könne, und bereicherte die Zahl der Beobachtungen, doch wagte er noch keine Theorie dieser Erscheinungen aufzustellen. PLATEAU [18] zog die Contrasterscheinungen mit in seine Theorie der Nachbilder hinein; wie die Netzhaut der Zeit nach in entgegengesetzte Gegenstände überginge, sollte sie es auch der Fläche nach thun, so dass zunächst um die erregte Stelle die gleiche Phase stattfinde, welche sich in den Irradiationserscheinungen kund gebe, und in weiterer Entfernung die entgegengesetzte, welche den Contrast hervorrufe.

Die Ansicht, dass die Contrasterscheinungen sich durch Nachbilder erklärten, wurde schon von JURIN [19] vorgetragen, später von BRANDES. Sie war für einen Theil der Erscheinungen richtig, aber nicht für alle, und FECHNER namentlich zeigte, dass auch ohne vorhergehende Ermüdung der betreffenden Netzhautstelle Contrastfarben entstehen könnten.

---

1 *Trattato della pittura.* Cap. CC. — Farbige Schatten in Cap. CLVI. und CCCXXVIII.
2 Exper. Magdeb. p. 142.
3 *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1743. p. 217.
4 Abh. der Akad. zu Berlin 1752.
5 *Edinb. Essays.* Vol. II. p. 75.
6 *Traité d'Optique.* p. 368.
7 *Mém. de l'Acad. de Berlin.* 1767. p. 27.
8 *Philos. Transact.* LXXXIV. 107; Gren's neues Journal der Physik. II. 58.
9 Farbenlehre. S. 27.
10 SCHWEIGGER's Beiträge zur Chemie und Physik. III. 14.
11 GEHLER's neues Wörterbuch. Art: Farbe.
12 Die Erscheinungen des Schattens. Berlin 1830.
13 Münchner Denkschr. 1811 und 12. S. 293, und 1813. S. 5
14 Unterhaltungsblätter für Natur und Menschenkunde 1826. S. 49.
15 Pogg. Ann. XXVII. 694; XXXVII. 287; XLII. 72.
16 Ebenda. XXXVII. 319—341.
17 Ebenda. XLIV. 221. L. 433.
18 *Ann. de chim. et de phys.* LVIII. 339. Pogg. Ann. XXXII. 543; XXXVIII. 626.
19 *Essay on distinct and indistinct vision.* p. 170.

Die Veränderungen der einzelnen Farben bei ihrer Zusammenstellung mit anderen beschrieb Chevreul [1] genau. Die complementären Spiegelbilder an gefärbten Glasplatten wurden von Brandes [2] und Osann beschrieben; die beste Form gab Dove [3] diesem Versuche, welche später Ragona Scina [4] noch abänderte. Die Fälle, wo das inducirte Feld dem inducirenden gleich gefärbt wird, fanden Fechner und Brücke [5]. Dass ein schwacher Unterschied der Farben vortheilhafter sei als ein starker, zeigte H. Meyer [6]. Uebrigens schlossen sich die neueren Beobachter fast alle der Ansicht von Plateau an, dass der Contrast auf einer Veränderung der Empfindung beruhe. Ich selbst habe im vorliegenden Paragraphen die verschiedenen concurrirenden Ursachen vollständiger als bisher zu trennen gesucht, und mich bemüht zu zeigen, dass der reine simultane Contrast auf einer Veränderung nicht der Empfindung, sondern der Beurtheilung beruhe.

1651. Leonardo da Vinci († 1519). *Trattato della pittura.* Cap. CLVI, CC, CCCXXVIII.
1672. Otto v. Guericke. Experimenta nova, ut vocantur, Magdeburgica de vacuo spatio. Amstelod. 1672. p. 142.
1738. Jurin. *Essay on distinct and indistinct vision.* p. 170.
1743. G. de Buffon. *Sur les couleurs accidentelles. Mém. de Paris.* 1743. p. 217.
1752. Mazeas. *Mém. de l'Acad. de Berlin.* 1752.
1760. Bouguer. *Traité d'optique sur la gradation de la lumière.* Paris 1760. p. 368.
Melville. *Observations on light and colours. Essays and observations. Phys. and Litt.* Edinburgh II. 12 und 75.
1767. Beguelin. *Mémoire sur les ombres colorées. Mém. de l'Acad. de Berlin.* 1767. p. 27; 1783, p. 52.
1778. v. Gleichen genannt Russworm. Von den Farben des Schattens. Act. Acad. Mogunt. 1778. p. 308.
1782. H. F. T. *Observations sur les ombres colorées.* Paris 1782.
1783. Flaugergues. *Sur les ombres colorées. Mém. de Berlin.* 1783. p. 52.
1783. Opoix. *Journal de Physique.* 1783 Dec.
Petrini. *Mem. di Math. e di Fisica del Soc. Ital.* XIII. p. 11.
1787. Carvalho e Sampago. *Tratado das Cores.* Malta 1787.
1805. Prieur. Bemerkungen über die Farben und einige besondere Erscheinungen derselben. Gilb. Ann. XXI. p. 315. *Ann. de Chim.* LIV. p. 1.
Hassenfratz. *Sur les ombres colorées. Journ. de l'école polytechn.* Cah. XI.
1810. v. Goethe. Zur Farbenlehre. S. 27.
1811. Grothuss. Ueber die zufälligen Farben des Schattens. Schweigger's Journal III. 14.
v. Paula Schrank. Ueber die blauen Schatten. Abh. der Münchener Akad. 1811. p. 293 und 1813. p. 57.
1820. Muncke. Ueber subjective Farben und gefärbte Schatten. Schweigger's Journ. XXX. 47.
1826. Zschokke. Die farbigen Schatten, ihr Entstehen und ihr Gesetz. Aarau 1826. Unterhaltungsblätter für Natur- und Menschenkunde 1826. S. 49.
1827. Brandes. Art.: Farbe in Gehler's neuem physik. Wörterbuch IV. 124.
Treschel. *Biblioth. univers.* XXXII. 3.
1830. Tourtual. Ueber die Erscheinungen des Schattens und deren physiologische Bedingungen, nebst Bemerkungen über die wechselseitigen Verhältnisse der Farben. Berlin 1830.
Lehot in: *Annales des sciences d'observation par* Saigey et Raspail 1830. III. 3. Froriep's Notizen XXVIII. p. 177.
1832. Osann. Vorrichtung zur Hervorbringung complementarer Farben und Nachweis ihrer objectiven Natur. Pogg. Ann. XXVII. 694. XXXVII. 287. XLII. 72.
Smith von Fochabers in *Edinb. Journ. of Science.* V. 52.
Brewster. Ueber den Versuch von Smith in Pogg. Ann. XXVII. 494.
Chevreul. *Sur l'influence, que deux couleurs peuvent avoir l'une sur l'autre, quand on les voit simultanément. Mém. de l'Acad. de Paris.* XI. 1832. — *De la loi du contraste simultané des couleurs.* Strasbourg 1839.
1834. J. Müller. In seinem Archiv für Anat. und Physiol. 1834. p. 144. Lehrbuch d. Physiol. 2. Aufl. II. 372.

---

[1] *Mém. de l'Acad.* XI. 447—520.
[2] Gehler's neues Wörterbuch. Art. Farbe. IV. 124.
[3] Pogg. Ann. XLV. 158.
[4] Racc. fisico-chimica. II. 207.
[5] Denkschr. d. Wiener Akademie. III. 1850 Octob. 3.
[6] Pogg. Ann. XCV. 170.

Plateau in: *Ann. de chim. et de phys.* LVIII. 339. Pogg. Ann. XXXII. 543. XXXVIII. 626.

1836. Pohlmann. Theorie der farbigen Schatten. Pogg. Ann. XXXVII. 319—341.

1838. * Fechner. Ueber die Frage, ob die sogenannten Farben durch den Contrast objectiver Natur seien. Pogg. Ann. XLIV. 221—245.

Dove. Ueber subjective Complementärfarben. Pogg. Ann. XLV. 158.

1840. * Fechner. Thatsachen, welche bei einer Theorie der Farben durch den Contrast zu berücksichtigen sind. Pogg. Ann. L. 433.

1847. D. Ragona Scina. *Su taluni fenomeni che presentano i cristalli colorati. Racc. fis. chim.* II. 207.

1851. E. Brücke. Untersuchungen über subjective Farben. Wiener Denkschr. III. 95. Pogg. Ann. LXXXIV. 418. *Arch. d. sc. phys. et natur.* XIX. 122.

1852. A. Beer. Ueber das überzählige Roth im Farbenbogen der totalen Reflexion (Contrastfarbe). Pogg. Ann. LXXXVII. 113—115. *Cosmos.* II. 95.

1855. H. Meyer. Ueber Contrast- und Complementärfarben. Pogg. Ann. XCV. 170—171. *Ann. de chim.* (3) XLV. 507. *Phil. Mag.* (4) IX. 547.

§. 25. Verschiedene subjective Erscheinungen.

Es bleiben noch einige subjective Gesichtserscheinungen zu beschreiben übrig, deren Erklärung für jetzt unmöglich oder wenigstens ziemlich zweifelhaft ist, und welche deshalb in die vorausgegangenen Paragraphen nicht eingereiht werden konnten.

1. Erscheinungen des gelben Flecks. Der gelbe Fleck bildet eine in vielen Beziehungen ausgezeichnete Stelle der Netzhaut. Die Eigenthümlichkeiten seiner anatomischen Structur sind auf S. 27 beschrieben. Ferner zeichnet er sich physiologisch aus durch die Schärfe in der Wahrnehmung kleiner Bilder, worin sein Centrum, die Netzhautgrube, alle anderen Stellen der Netzhaut bei weitem übertrifft. Dadurch erhält er auch seine Bedeutung als Fixationspunkt. Wie er im entoptischen Bilde sichtbar gemacht werden kann, ist schon in §. 15 (S. 156—159) auseinandergesetzt; er zeichnet sich bei dieser Beobachtungsweise dadurch aus, dass die Gefässe in seinem Centrum fehlen, und zweitens durch den Schatten, den die seitlichen Abhänge der Netzhautgrube bei schiefer Beleuchtung werfen. Betreffs der Empfindungen dieser Netzhautstelle haben wir schon erwähnt, dass sie bei der elektrischen Durchströmung des Auges je nach der Strömungsrichtung bald dunkel auf hellem Grunde, bald hell auf dunklem Grunde sich abzeichnet, ferner dass sie bei mässig schnell intermittirendem Lichte sich durch eine eigenthümliche sternförmige Zeichnung in den schillernden Figurenmustern der Netzhaut hervorhebt.

Es ist jetzt noch zu erwähnen, dass sie auch bei gleichmässig ausgebreiteter, namentlich blauer Beleuchtung sich eigenthümlich abzeichnet. Es erscheinen hierbei verschiedene Theile des gelben Flecks, nicht immer alle gleichzeitig, unter verschiedenen Bedingungen verschieden deutlich. Das Centrum des gelben Flecks ist die Netzhautgrube, in deren Grunde die Netzhaut sehr dünn, durchsichtig und ungefärbt ist. Ihr Durchmesser ist nach Koelliker 0,18 bis 0,225 Mm. Ihr Abstand vom hinteren Knotenpunkte des Auges ist 15 Mm., also im Mittel 75 mal so gross als ihr Durchmesser. Ihre scheinbare Grösse im Gesichtsfelde ist also ein Kreis, dessen Durchmesser 40 bis 50 Minuten ist. Sie erscheint, wenn sie sichtbar wird, gewöhnlich als ein gut begrenzter regelmässiger Kreis. Die Netzhautgrube umgebend erscheint oft ein dunkler Hof,

dessen Grösse ungefähr der gefässlosen Stelle des gelben Flecks entspricht, wie sie erscheint, wenn man die Gefässe entoptisch sichtbar macht. Die äussere Begrenzung dieses Hofs, den wir den gefässlosen nennen wollen, ist verwaschen, sein Durchmesser ungefähr dreimal grösser als der der Netzhautgrube, beträgt also etwas über 2 Winkelgrade. Bald erscheint seine Grenze ziemlich kreisförmig, namentlich bei schwachem Lichte, bald einem Rhombus ähnlicher, dessen längere Diagonale horizontal liegt. In letzterer Weise erscheint sie mir selbst namentlich bei stärkerem Licht. Es entspricht diese Stelle anatomisch dem mittleren intensiv gelb gefärbten Theile des gelben Flecks, dessen horizontaler Durchmesser von H. Müller in zwei Augen gleich 0,88 und 1,5 Mm., der verticale gleich 0,53 und 0,8 gefunden wurde. Uebrigens breitet sich die gelbe Färbung noch viel weiter aus, ist aber schwach und verwaschen.

Endlich sieht man bei stärkerem Licht den dunklen gefässlosen Hof noch umgeben von einem hellen Hofe, dessen äussere Begrenzung sehr unbestimmt bezeichnet ist, und die mir selbst ebenfalls mehr rhombisch, als kreisförmig erscheint. Ihre beiden Durchmesser sind etwa drei mal so gross, als die des dunklen gefässlosen Hofes. Ein anatomisch wohlbegrenztes Substrat dieser Stelle lässt sich nicht bezeichnen. Die gelbliche verwaschene Färbung der äusseren Theile des gelben Flecks fällt mit diesem hellen Hofe einigermassen zusammen. Doch lässt sich über die Congruenz ihrer Grösse nichts sagen, da die Ausdehnung der schwachen gelben Färbung zu breite individuelle Abweichungen zeigt. Vielleicht verdankt dieser äusserste helle Hof seinen Ursprung auch nur einer Contrastwirkung, wir können ihn nach seinem Entdecker, dem er kreisförmig erschien, den Loewe'schen Ring nennen.

Loewe [1] entdeckte diesen Ring, indem er durch eine klare seladongrüne Auflösung von Chromchlorid nach einer hellen Fläche sah. Der Ring erschien im Vergleich zu dem grünlichen Grunde violett, den mittleren dunkleren Hof umgebend, so dass ihn Haidinger mit einem Abbilde der Iris vergleicht, die die dunkle Pupille umgiebt. Haidinger zeigte, dass dichromatische Mittel zur Herstellung der Ringe nicht nöthig seien, dass sie im homogenen Blau des prismatischen Spectrum erscheinen, und auch in gemischtem Licht, welches genügend Blau enthält. In letzterem zeigen sie verschiedene Farbenunterschiede von dem übrigen Grunde, je nach der Beschaffenheit der dem Blau zugemischten Farben. Verschiedenen Augen scheint dieser Ring mit verschiedener Deutlichkeit zu erscheinen, so dass viele ihn überhaupt nicht sehen können. Ich selbst sehe ihn nur bei einer gewissen mittleren Helligkeit, derjenigen etwa, die uns zum Schreiben und Lesen bequem ist. Wenn ich vor die Augen ein blaues Glas halte, sie durch Verschluss der Lider eine Weile ausruhe, und dann durch das Glas nach einer weissen Papierfläche sehe, erblicke ich deutlich den gefässlosen Hof, als einen rhombischen schattigen Fleck, umgeben von einem rhombischen, heller blauen Streifen, den Loewe'schen Ring. Bei etwas grösserer und etwas kleinerer Helligkeit erscheint mir der Loewe'sche Ring schmaler, bei

---

[1] Haidinger in Pogg. Ann. LXX. 403. LXXXVIII. 451. Wiener Sitzungsber. IX. 240.

noch grösseren Abweichungen der Helligkeit sehe ich nur den dunklen gefässlosen Hof ohne helle Umsäumung.

Der dunkle gefässlose Hof ist der constanteste Theil der Erscheinung. Sein Verhalten ist zuerst von Maxwell[1] genauer untersucht worden. Wenn man homogenes Licht anwendet, erscheint er nach ihm nur im Blau, nicht in anderen Farben. Uebrigens erscheint er auch in gemischten Farben, wenn sie Blau reichlich enthalten, namentlich auch, freilich schwach, im Weiss. Wenn man das ausgeruhte Auge nach einer blauen Fläche hinwendet, erscheint er, und schwindet bald wieder, bei heller Beleuchtung schneller als bei schwacher. Maxwell empfiehlt abwechselnd vor das Auge blaue und gelbe Gläser oder blaue und gelbe Papiere zu bringen. Im Blau erscheint der Fleck, im Gelb verschwindet er. Ich selbst sehe ihn am schönsten am Abendhimmel, wenn die ersten Sterne zu erscheinen anfangen, und man sich schon längere Zeit im Freien befindet, so dass die Augen hinreichend ausgeruht sind. Wenn man sie einige Augenblicke schliesst, und dann nach dem Himmel hin öffnet, sieht man den gefässlosen Hof einige Zeit lang sehr deutlich, die Netzhautgrube in seinem Innern auch häufig und zwar als einen etwas helleren Fleck von reinerem Blau, ziemlich scharf begrenzt. Dabei ist es eigenthümlich, dass, wie schon Maxwell bemerkt hat, der Lichteindruck in den centralen Stellen der Netzhaut einen Moment später zur Empfindung kommt, als in den peripherischen Theilen. Maxwell liess zu dem Ende eine Reihe dunkler Streifen vor einem blauen Felde mit gewisser Geschwindigkeit vorbeigehen. Man sieht es aber auch beim einfachen Aufschlagen der Augen. Das Dunkel der geschlossenen Augen schwindet deutlich von der Peripherie des Gesichtsfeldes nach dem Centrum hin, und der letzte Rest desselben bleibt als der Maxwell'sche Fleck bestehen. Bei gewissen Helligkeitsgraden, namentlich dem oben bezeichneten des Himmels, wenn die ersten Sterne sichtbar werden, ist die Erscheinung beim Aufschlagen der Augen noch complicirter. Während nämlich in der beschriebenen Weise das Dunkel von der Peripherie nach dem Centrum schwindet, sieht man auch noch entweder die Netzhautgrube allein, oder den ganzen Maxwell'schen Fleck hell aufblitzen. Vielleicht geht das helle Aufblitzen der dunklen Erscheinung etwas voraus, aber die Zeit ist so kurz, dass beides scheinbar gleichzeitig eintritt, wie auch Aubert an Nachbildern bei der Beleuchtung durch den elektrischen Funken ähnliches bemerkt hat.

Zuweilen, wenn die Netzhautgrube recht deutlich erscheint, sehe ich in dem gefässlosen Hofe noch schwache Linienzeichnungen, ähnlich den Umrissen einer vielblättrigen Blume (z. B. einer Georgine, Dahlia). Es sind dies wohl Andeutungen derselben Zeichnung, welche deutlicher bei intermittirendem Lichte zum Vorschein kommt.

Endlich muss ich noch bemerken, dass ich den Maxwell'schen Fleck oft zufällig des Morgens nach dem Aufstehen, wenn ich das Auge zuerst auf ein helles Fenster mit breiter lichter Fläche geheftet hatte, und es dann nach einem

---

[1] *Athenäum.* 1856. p. 1093. *Edinb. Journ.* (2) IV. 337. *Inst.* 1856. p. 124. *Rep. of British Association.* 1856. II. 12.

dunklen Orte wendete, hell auf dunklem Grunde gesehen habe. Absichtlich die Erscheinung hervorzurufen ist mir bisjetzt nicht gelungen. Es erscheint hierbei ein blendend heller Kreis von der Grösse des gefässlosen Hofes, nach den Rändern hin abschattirt, und mit Andeutungen der strahligen Zeichnung. Diese letztere Erscheinung lässt schliessen, dass wenn das Auge recht erholt und reizbar ist, der Lichteindruck im gelben Fleck länger anhält als in den übrigen Theilen der Netzhaut, während andererseits der Lichteindruck an derselben Stelle auch später zu beginnen scheint, wie die beschriebenen Erscheinungen beim Oeffnen des Auges zeigen. Dass der stark gefärbte Theil des gelben Flecks auf einem blauen Felde dunkel erscheint, scheint der Absorption des blauen Lichts durch das gelbe Pigment zugeschrieben werden zu dürfen. Gelb gefärbt sind hier gerade die Theile, welche vor den eigentlich lichtempfindlichen Theilen, den Zapfen, liegen. Dass der Fleck übrigens subjectiv nur schwach gezeichnet und schnell vorübergehend erscheint, erklärt sich in derselben Weise, wie das flüchtige Erscheinen der Gefässfigur. Das zuweilen vorkommende helle Aufblitzen des gelben Flecks dagegen beim Oeffnen des Auges lässt sich noch nicht erklären.

Wie bisher beschrieben, verhalten sich die Erscheinungen im nicht polarisirten Lichte. Wenn man dagegen das Auge auf ein Feld richtet, von wo polarisirtes Licht kommt, so erscheinen Haidinger's Polarisationsbüschel im Fixationspunkte. Man sieht diese z. B., wenn man durch ein Nicol'sches Prisma nach einem gut beleuchteten weissen Papierblatte oder nach einer hellen Wolkenfläche blickt. Die Büschel sind auf *Taf. V, Fig. 5* abgebildet, wie sie liegen, wenn die Polarisationsebene des Lichtes vertical ist. Die helleren durch zwei zusammengehörige Hyperbeln begrenzten Flecke erscheinen auf weissem Felde bläulich, der dunkle Büschel, der sie trennt, und im Centrum am schmalsten, nach seinen Enden hin breiter ist, ist dagegen gelblich gefärbt. Wenn man das Nicol'sche Prisma dreht, dreht sich die Polarisationsfigur um den gleichen Winkel. Nach einer Bemerkung von Brewster, die ich für mein Auge bestätigen kann, ist der dunkle Büschel in seiner Mitte viel schmaler, wenn er horizontal (d. h. der Verbindungslinie beider Augen parallel) gerichtet ist, als wenn er senkrecht steht, wie in der Abbildung. Die Fläche, welche von der Polarisationsfigur bedeckt wird, erscheint Maxwell's und meinem Auge an Grösse dem gefässlosen Hofe des gelben Flecks gleich. Der Rand der Netzhautgrube geht ungefähr durch die hellsten Stellen der blauen Flächen hindurch. Brewster giebt den Durchmesser der Polarisationsbüschel etwas grösser an, nämlich 4°, und Silbermann 5°, was vielleicht damit zusammenhängt, dass sie in verschiedenen Augen sehr verschiedene Deutlichkeit zu haben scheinen, und deshalb die schwächsten Theile der Figur am äussersten Rande von einigen wahrgenommen werden, von anderen nicht. Ich selbst habe vor 12 Jahren unmittelbar nach Haidinger's Entdeckung mit der grössten Mühe nichts von den Büscheln wahrnehmen können, und in der letzten Zeit, als ich es wieder versuchte, sah ich sie beim ersten Blick durch ein Nicol'sches Prisma. Auch ist in meinem linken Auge die Mitte des dunklen Büschels viel dunkler, als im rechten. Daran ist vielleicht die veränderliche Färbung des gelben Flecks Schuld.

Wenn man sie übrigens sieht, so schwinden sie doch immer bald wieder, wie jede subjective Erscheinung, die an eine Structur der Netzhaut gebunden ist. Sie treten dann neu hervor, wenn man den Polarisator um 90° dreht.

Individuen, welche die Büschel recht deutlich wahrnehmen, sehen sie auch in solchem Lichte, welches nur theilweise polarisirt ist, auf glänzenden Flächen, am Himmel u. s. w. und sind dadurch im Stande, überall gleich die Richtung der Polarisationsebene zu erkennen. Von den verschiedenen Farben homogenen Lichts zeigt aber, wie STOKES gefunden hat, nur das Blau die Polarisationsbüschel. In den weniger brechbaren Theilen des Spectrum kommen sie nicht zur Erscheinung. In einem blauen Felde erscheinen die bläulichen Hyperbelflächen hell, der gelbe Büschel dazwischen dagegen dunkel, so z. B. wenn man durch ein stark gefärbtes blaues Glas und den Polarisator nach einer weissen Fläche blickt. Ich selbst sehe die Büschel nicht blos nicht in homogenem Grün, Gelb, Roth, sondern auch nicht einmal in den gemischten, aber ziemlich gesättigten Abstufungen dieser Farbentöne, welche gefärbte Gläser geben. Es folgt daraus, dass auch im weissen Licht die Erscheinung von den Veränderungen des Blau herrührt. Am Orte der gelben Büschel fehlt das Blau, und diese erscheinen eben deshalb gelb und dunkler.

Wenn Licht durch Refraction, Reflection oder Doppelbrechung polarisirt wird, werden stets sämmtliche Farben nahehin gleichmässig von der Polarisation betroffen. Nur bei der Absorption farbigen Lichts in doppeltbrechenden Körpern kann es vorkommen, dass das Licht gewisser Farben polarisirt wird, das Licht anderer Farben dagegen nicht. Das bekannteste Beispiel solcher Absorption ist der Turmalin, welcher so häufig als Mittel, Licht zu polarisiren, gebraucht wird. Es ist diese Eigenschaft übrigens unter den doppeltbrechenden gefärbten Körpern sehr verbreitet, man kann sie durch Färbung derselben künstlich erzeugen, und sie beruht darauf, dass bald wie im Turmalin der ordentliche, bald wie im Rutil und Zinnstein der ausserordentliche Strahl stärker absorbirt wird. Nun sind aber die meisten organischen Fasern und Membranen schwach doppeltbrechend und zwar verhalten sich beide meist wie einaxige Krystalle, deren Axe in den Fasern parallel ihrer Länge, in den Membranen senkrecht zu ihrer Fläche steht. Die Erscheinung der Polarisationsbüschel ist nun zu erklären, wenn man annimmt, dass die gelbgefärbten Elemente des gelben Flecks schwach doppelbrechend sind, und dass der ausserordentliche Strahl von blauer Farbe in ihnen stärker absorbirt werde, als der ordentliche Strahl.

Geht blaues Licht von beliebiger Polarisation durch eine Fasermasse von dieser Eigenschaft in Richtung der Fasern, so wird es stark absorbirt; geht es dagegen senkrecht gegen die Richtung der Fasern hindurch, so wird es stark absorbirt werden, wenn es parallel den Fasern polarisirt ist, schwach dagegen, wenn seine Polarisationsrichtung ebenfalls senkrecht zur Richtung der Fasern ist. Nun verlaufen im gelben Fleck die sogenannten radiären Fasern von H. MÜLLER, welche an anderen Stellen der Netzhaut senkrecht gegen deren Fläche stehen, schräg, indem ihr hinteres Ende sich der Netzhautgrube nähert [1].

[1] BERGMANN in HENLE und PFEUFFER Zeitsch. für rat. Med. (2) V. 245; (3) II. 83. — MAX SCHULTZE. Observationes de Retinae structura penitiori. Bonn. 1859. p. 15.

In der Centralgrube fehlen die Körnerschichten und die Zwischenkörnerschicht entweder ganz, oder sind wenigstens sehr dünn, dagegen ist die innere Körnerschicht und die Zwischenkörnerschicht in der Umgebung der Netzhautgrube dicker als an anderen Stellen; ähnlich verhält sich die Schicht der Ganglienzellen, obgleich diese auch in der Centralgrube doch noch 3 Reihen Zellen hinter einander enthält, so dass es scheint, als ob die zu den Zapfen der Centralgrube gehörigen anderen Elemente in der Umgebung dieser Grube angehäuft seien, und deshalb die Verbindungsfasern sowohl nervöser als bindegewebiger Natur schräg verlaufen müssen. An dem Rande der Netzhautgrube nun, wo die Fasern überwiegend eine schräg gegen ihr Centrum verlaufende Richtung haben, würde nach der gemachten Annahme das Licht stärker dort absorbirt werden, wo die Fasern der Polarisationsebene parallel laufen. Ist letztere vertical, so werden also über und unter der Netzhautgrube sich dunklere Stellen bilden, rechts und links hellere. Ebenso würden die Stellen dunkler werden müssen, wo die Fasern nicht mehr schräg gegen die Fläche der Netzhaut liegen, also im Centrum der Grube selbst, und nach dem äusseren Rande des gelben Flecks hin. In der That entspricht die Erscheinung der Polarisationsbüschel diesen Folgerungen.

Man hat noch andere Ansichten über die Entstehung der Polarisationsbüschel aufgestellt. Unter diesen ist namentlich die von Erlach angedeutete, von Jamin specieller ausgeführte, ziemlich günstig aufgenommen. Beide meinten die Büschel herleiten zu können von den vielfachen Refractionen, die das Licht an den brechenden Flächen des Auges erleidet. In der That würde senkrecht polarisirtes Licht, welches von oben oder unten her in das Auge dringt, stärker reflectirt und weniger eingelassen werden, als solches, welches von rechts oder links her kommt, und demnach müsste der obere und untere Quadrant des Gesichtsfeldes etwas dunkler erscheinen, als der rechte und linke. Aber wenn Polarisation durch Refraction der Grund wäre, müssten erstens die Büschel in allen homogenen Farben nahehin gleich deutlich erscheinen, während sie nur im Blau deutlich erscheinen. Zweitens müssten sie nach den Rändern des Gesichtsfeldes hin continuirlich an Stärke zunehmen. Im Gegentheil sind sie auf einen sehr kleinen centralen Theil beschränkt. Drittens müsste ihr Centrum im Axenpunkte des Auges liegen, nicht im Fixationspunkte, der von jenem, wie es scheint, in allen Augen verschieden ist. Es haben auch schon Stokes, Brewster und Maxwell auf das ungenügende dieser Erklärung aufmerksam gemacht, und die beiden letzteren haben bemerkt, dass die Ausdehnung der Büschel mit der des gelben Flecks übereinkomme. Allerlei andere, aber nicht klar durchgeführte Erklärungen sind auch von Haidinger und Silbermann gegeben.

Haidinger beschreibt im blauen Felde, wo man die Loewe'schen Ringe sieht, auch noch helle Andreaskreuzlinien, über die noch keine Beobachtungen von anderen Augen vorliegen. Ich selbst kann sie nicht sehen.

1844. W. Haidinger. Ueber das directe Erkennen des polarisirten Lichts. Pogg. Ann. LXIII. 29.
1846. Derselbe. Ueber complementare Farbeneindrücke bei Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel. Pogg. Ann. LXVII. 435.
Derselbe. Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel in geradlinig polarisirtem Lichte. Pogg. Ann. LXVIII. 73.
Derselbe. Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel auf Flächen, welche das Licht in zwei senkrecht auf einander stehenden Richtungen polarisiren. Pogg. Ann. LXVIII. 305.
Silbermann. *Essai d'explication des houppes ou aigrettes visibles à l'oeil nu dans la lumière polarisée.* C. R. XXIII. 624. *Inst.* No. 665. p. 327.

1847. v. ERLACH. Mikroskopische Beobachtungen über organische Elementartheile bei polarisirtem Licht, in MÜLLER's Archiv für Anat. und Physiol. 1847. p. 313.
HAIDINGER. Helle Andreaskreuzlinien in der Sehaxe. Ber. d. Freunde der Naturwiss. in Wien II. 178. Pogg. Ann. LXX. 403.
BOTZENHART. Polarisationsbüschel am Quarz. Ber. d. Fr. d. N. W. in Wien I. 82.
Derselbe. *Sur une modification des houppes colorées de* HAIDINGER. C. R. XXIV. 44. *Inst.* No. 680. p. 11. Pogg. Ann. LXX. 399.
1848. JAMIN. *Sur les houppes colorées de* HAIDINGER. C. R. XXVI. 197. Pogg. Ann. LXXIV. 145. *Inst.* No. 737. p. 53.
1850. D. BREWSTER. *On the polarizing structure of the eye. Sillim. J.* (2) X. 394. *Rep. of British Assoc.* 1850. II. 5. Wiener Ber. V. 442.
G. G. STOKES *on* HAIDINGER's *brushes Sillim. J.* (2) X. 394. *Rep. of British Assoc.* 1850. II. 20.
W. HAIDINGER. Das Interferenzschachbrettmuster und die Farbe der Polarisationsbüschel. Wien. Ber. VII. 389. Pogg. Ann. LXXXV. 350. *Cosmos.* I. 252, 454.
1852. Derselbe. Die LOEWE'schen Ringe eine Beugungserscheinung. Wien. Ber. IX. 240 bis 249. Pogg. Ann. LXXXVIII. 451—461.
1854. W. HAIDINGER. Dauer des Eindrucks der Polarisationsbüschel auf der Netzhaut. Wien. Ber. XII. 678—680. Pogg. Ann. XCIII. 318—320.
Derselbe. Beitrag zur Erklärung der Farben der Polarisationsbüschel durch Beugung. Wien. Ber. XII, 3—9. Pogg. Ann. XCI. 591—601.
Derselbe. Einige neuere Ansichten über die Natur der Polarisationsbüschel. Wien. Ber. XII. 758—765. Pogg. Ann. XCVI. 314—322.
STOKES. Ueber das optische Schachbrettmuster. Wien. Ber. XII. 670—677. Pogg. Ann. XLVI. 305—313.
1856. J. C. MAXWELL. *On the unequal sensibility of the foramen centrale to light of different colours. Athen.* 1856. p. 1093. *Edinb. Journ.* (2) IV. 337. *Inst.* 1856. p. 444. *Rep. of Brit. Assoc.* 1856. II. 12.
1858. POWER in *Phil. Mag.* (4) XVI. 69.
1859. BREWSTER in C. R. XLVIII. 614.

2. Helle bewegliche Punkte erscheinen im Gesichtsfelde, wenn man namentlich während angestrengten Gehens oder anderer Leibesbewegung, eine grosse gleichmässig erleuchtete Fläche, z. B. den Himmel oder Schneefelder starr ansieht. Die Pünktchen springen an verschiedenen Orten des Gesichtsfeldes auf, und laufen in sehr verschiedenen meist nicht ganz geraden Bahnen ziemlich schnell fort. Dabei erscheinen auf dem Wege, den eines eingeschlagen hat, nach kurzen Zwischenzeiten neue, die auf demselben Wege fortlaufen. PURKINJE bemerkt, dass wenn man nach einer begrenzten lichten Fläche, z. B. gegen ein Fenster schaut, jeder Punkt auf der von der Mitte des Sehfeldes abgekehrten Seite ein kleines Schattenbild nach sich zieht. Da sie feste Wege einzuhalten scheinen, sind sie von manchen Beobachtern (J. MÜLLER) für eine Erscheinung des Blutlaufs gehalten worden. Sie sind aber, wenigstens in meinem Auge, viel zu vereinzelt, als dass man sie für Blutkörperchen halten könnte, ihre Bahnen ebenfalls viel zu weit von einander entfernt, und ihre Bewegung zu schnell, als dass ihre Wege einem Capillarnetz entsprechen könnten. Wenn ihre Erscheinung wirklich mit dem Blutlauf zusammenhängt, könnte man höchstens daran denken, dass einzelne vielleicht fettreiche Lymphkörperchen, die durch grössere Gefässstämmchen hinfliessen, sich in dieser Art zeigen. Diese Erscheinung scheint übrigens von den meisten Menschen leicht gesehen zu werden.

Die Blutkörperchen sind übrigens eben noch gross genug, um wenn sie sich in der Netzhaut befinden, und auf diese einen Eindruck machen, noch erkannt zu werden. Ihr Durchmesser beträgt im Mittel 0,0072 Mm. und die Grösse der kleinsten erkennbaren Distanzen ist 0,005 Mm. (siehe S. 216). Verschiedene

Beobachter haben denn auch Reihen von fortlaufenden Kügelchen und unbestimmtere wallende und fliessende Bewegungen bei verschiedenen Veranlassungen gesehen. Die eigenthümliche Erscheinung in einander verschlungener Strömungen, welche bei intermittirendem Lichte eintritt, und von VIERORDT auf den Blutlauf der Aderhaut bezogen wird, ist schon oben erwähnt. Aehnliches sieht man übrigens auch zuweilen ohne intermittirendes Licht, wenn man in eine helle Fläche hineinstarrt, besonders nachdem man durch Bücken das Blut nach dem Kopf getrieben hat. Sobald durch den Lichteindruck die Netzhaut so weit ermüdet ist, dass die Fläche dunkel wird, erscheint gleichsam hinter der hellen Fläche, welche verschwindet, eine gefleckte röthliche Fläche, deren Flecken bald bewegt, bald ruhig sind. Reihen von fliessenden Kügelchen haben STEINBUCH und PURKINJE [1], namentlich bei schwachem Drucke auf das Auge gesehn. Letzterer sah sie zuerst bei Beobachtung der dunklen Accommodationsfigur, welche bei ihm aus einem centralen weissen Kreise, umgeben von einem bräunlichen unbestimmt begrenzten Hofe bestand. Rechts und links neben dem weissen Kreise sah er zwei senkrechte lichte Linien, in denen sich Reihen von Kügelchen bewegten, rechts abwärts, links aufwärts. Ich habe bis jetzt nichts Aehnliches sehen können. JOHANNES MÜLLER [2] sah bei Congestionen nach dem Kopfe, oder wenn er sich gebückt hatte und sich plötzlich aufrichtete, ein Springen und Fahren, wie von dunklen geschwänzten Körpern in den mannigfaltigsten Richtungen, und vergleicht diese Erscheinung mit dem Ameisenlaufen in den Gefühlsnerven.

Ein Flimmern wie von kleinen bewegten Körpern sehe ich auch zuweilen von einer mit grobem Kalk beworfenen und sehr schief durch ein kleines Fenster beleuchteten Wand, die daher mit einer Menge kleiner schwarzer unregelmässiger Punkte übersät erscheint. Aber hier könnten es vielleicht Nachbilder der Pünktchen sein, welche durch unvermeidliche kleine Schwankungen des Auges aufblitzen.

PURKINJE beschreibt noch andere Erscheinungen, die bei Aufregung des Gefässsystems oder Anstrengung der Augen eintraten. Seine Beschreibung lautet [3]: „Wenn ich bei hellem Tage eine viertel bis halbe Stunde im Freien stark gegangen bin, und ich trete plötzlich in einen finsteren oder wenigstens stark verdunkelten Raum, so wallt und flackert im Gesichtsfelde ein mattes Licht, gleich der auf einer horizontalen Fläche verlöschenden Flamme von ausgegossenem Weingeiste, oder gleich einer im Finstern schwach flimmernden mit Phosphor bestrichenen Stelle. Bei schärferer Betrachtung bemerke ich, dass der flackernde Nebel aus unzählbaren, äusserst kleinen unregelmässig lichten Pünktchen besteht, die sich in verschiedenen Linien unter einander bewegen, sich bald da bald dort anhäufen, unbestimmt begrenzte Flecke bilden, die sich wieder zertheilen um sich anderwärts zu versammeln. Jeder Punkt lässt eine lichte Spur seiner Bewegung hinter sich, welche Spuren sich mannigfaltig durchschneidend Netze und Sternchen bilden; so wimmelt es eine grosse Strecke

[1] Beobachtungen und Versuche I. 127.
[2] Physiologie II. 390.
[3] Beobachtungen und Versuche I. 63.

im Innern des Gesichtsfeldes und hindert das deutliche Sehen. Am ähnlichsten dieser Erscheinung ist das Gewimmel der sogenannten Sonnenstäubchen".

Er sieht dasselbe bei bedecktem rechten Auge, wenn er mit dem schwach- und fernsichtigen linken eine helle Fläche fixirt, ferner bei allmälig verstärktem Druck auf das linke Auge. Die Pünktchen erscheinen lebhafter bei offenem als bei geschlossenem Auge, besonders wenn dasselbe nach einer nicht gänzlich verdunkelten entfernten Stelle hinsieht. Das äussere Licht ist also der Erscheinung förderlich.

Pulsirende Kugeln, zweie an der rechten Seite des Gesichtsfeldes, eine Reihe an der unteren, drei an der linken Seite, erscheinen ihm auf der hellen Himmelsfläche, wenn er gelaufen ist, bei Druck auf das Auge oder bei angestrengtem Husten. Auch pulsirt der Fixationspunkt, und es erscheinen noch graue Streifen, theils kreisförmig den Fixationspunkt umgebend, theils radiale Gefässstreifen [1].

3. Figuren, die bei gleichmässig erleuchteter Netzhaut sichtbar werden. Purkinje [2] bemerkt, dass wenn er nach einer grossen etwas blendenden Fläche starr hinsieht (z. B. auf den gleichmässig mit Wolken überzogenen Himmel oder nahe in eine Kerzenflamme), in einigen Secunden wiederholt in der Mitte des Gesichtsfeldes lichte Punkte aufspringen, die ohne ihre Stelle geändert zu haben, schnell wieder verschwinden, und schwarze Punkte zurücklassen, die ebenso schnell wieder vergehen. Wendete er, während die Lichtpunkte hervorspringen, das Auge gegen eine stark verdunkelte Stelle, oder schloss er es, so setzte sich die Erscheinung auf gleiche Weise fort, nur in einem gemilderten Lichte, als würden durch das erste Hinsehen die Punkte nur entzündet, und glimmten dann für sich allein ab. Ich selbst habe ebenfalls häufig solche vereinzelte lichte Punkte, die nicht Nachbilder sein konnten, weil entsprechende kleine helle Gegenstände im Gesichtsfelde fehlten, und die dunklen Nachbilder zurückliessen, zufällig gesehen, aber meist nur einen auf ein Mal, und im Ganzen selten sich wiederholend.

Hierher gehört ferner Purkinje's Kreuzspinnengewebefigur [3] aus lichten röthlichen Linien auf rothem Grunde gebildet, die das Gewebe einer Kreuzspinne bald einfacher, bald complicirter nachbildete. Um die Figur gut zu sehen, hatte sich Purkinje so gelagert, dass die Strahlen der aufgehenden Sonne seine Augenlider treffen mussten. Beim Erwachen sah er hinter den geschlossenen Lidern die Figur.

Ueberhaupt ist das Werk von Purkinje ausserordentlich reich an subjectiven Beobachtungen ähnlicher Art, und wird noch lange eine Hauptfundgrube für ähnliche Beobachtungen bleiben. Aber viele von den Erscheinungen, die er beschreibt, sind von anderen Augen noch nicht wieder aufgefunden worden, und für diese bleibt es also vorläufig fraglich, ob sie nicht auf individuellen Eigenthümlichkeiten seiner Organe beruhten [4].

---

[1] Beobachtungen und Versuche I. 134.
[2] Ebenda. I. 67.
[3] Ebenda. II. 87.
[4] Siehe noch die Erscheinungen in No. XXII des ersten, in No. IV, V, XV des zweiten Bandes seiner Beobachtungen und Versuche.

Dritter Abschnitt.
Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen.

§. 26. Von den Wahrnehmungen im Allgemeinen.

Wir benutzen die Empfindungen, welche Licht in unserem Sehnervenapparate erregt, um uns aus ihnen Vorstellungen über die Existenz, die Form und die Lage äusserer Objecte zu bilden. Dergleichen Vorstellungen nennen wir Gesichtswahrnehmungen. Wir haben in diesem dritten Abschnitte der physiologischen Optik auseinanderzusetzen, was sich bisher über die Bedingungen, unter denen Gesichtswahrnehmungen zu Stande kommen, auf naturwissenschaftlichem Wege ermitteln liess.

Da Wahrnehmungen äusserer Objecte also zu den Vorstellungen gehören, und Vorstellungen immer Acte unserer psychischen Thätigkeit sind, so können auch die Wahrnehmungen immer nur vermöge psychischer Thätigkeit zu Stande kommen, und es gehört deshalb die Lehre von den Wahrnehmungen schon eigentlich dem Gebiete der Psychologie an, namentlich insofern hierbei die Art der darauf bezüglichen Seelenthätigkeiten zu untersuchen ist, und deren Gesetze festzustellen sind. Doch bleibt der physikalisch-physiologischen Untersuchung auch hier ein weites Feld der Arbeit, insofern nämlich festgestellt werden muss, und auf naturwissenschaftlichem Wege auch festgestellt werden kann, welche besonderen Eigenthümlichkeiten der physikalischen Erregungsmittel und der physiologischen Erregung Veranlassung geben zur Ausbildung dieser oder jener besonderen Vorstellung über die Art der wahrgenommenen äusseren Objecte. Wir werden also in dem vorliegenden Abschnitte zu untersuchen haben, an welche besonderen Eigenthümlichkeiten der Netzhautbilder, der Muskelgefühle u. s. w. sich die Wahrnehmung einer bestimmten Lage des gesehenen Objects in Bezug auf Richtung und Entfernung anknüpft, von welchen Besonderheiten der Bilder die Wahrnehmung einer nach drei Richtungen ausgedehnten körperlichen Form des Objects abhängt, unter welchen Umständen es mit beiden Augen gesehen einfach oder doppelt erscheint u. s. w. Unser Zweck ist also wesentlich nur das Empfindungsmaterial, welches zur Bildung von Vorstellungen Veranlassung giebt, in denjenigen Beziehungen zu untersuchen, welche für die daraus hergeleiteten Wahrnehmungen wichtig sind. Dieses Geschäft kann ganz nach naturwissenschaftlichen Methoden ausgeführt werden. Wir werden dabei nicht vermeiden können von psychischen Thätigkeiten und den Gesetzen derselben, so weit sie bei der sinnlichen Wahrnehmung in Betracht kommen, zu sprechen, aber wir werden die Ermittelung und Beschreibung dieser psychischen Thätigkeiten nicht als einen wesentlichen Theil unserer vorliegenden Arbeit betrachten, weil wir dabei den Boden sicherer Thatsachen und einer auf allgemein anerkannte und klare Principien gegründeten Methode kaum würden festhalten können. So glaube ich wenigstens vorläufig, das Bereich des psychologischen Theils der Physiologie der Sinne gegen die reine Psychologie abgrenzen zu müssen, deren wesentliche Aufgabe es ist, die Gesetze und Natur der Seelenthätigkeiten, so weit dies möglich ist, festzustellen.

Da indessen nicht ganz vermieden werden kann, von den in den Sinneswahrnehmungen wirksamen Seelenthätigkeiten zu reden, wenn man einen übersichtlichen Zusammenhang der Erscheinungen gewinnen, und die Thatsachen nicht unverbunden an einander reihen will, so will ich, um wenigstens Missverständnisse meiner Meinung zu verhüten, im Anhang dieses Paragraphen auseinandersetzen, was ich über die besagten Seelenthätigkeiten folgern zu dürfen glaube. Da indessen, wie die Erfahrung lehrt, in so abstracten Folgerungen selten Uebereinstimmung zwischen den Menschen zu erzielen ist, und Denker vom grössten Scharfsinn, namentlich Kant, schon längst diese Verhältnisse richtig und in strengen Beweisen auseinandergesetzt haben, ohne dass sie eine dauernde und allgemeine Uebereinstimmung der Gebildeten darüber zu Stande bringen konnten, so werde ich versuchen die späteren der Lehre von den Gesichtswahrnehmungen speciell gewidmeten Paragraphen von allen Ansichten über Seelenthätigkeit frei zu erhalten, welche in das Bereich der zwischen den verschiedenen philosophischen Schulen bisher und vielleicht für immer streitigen Punkte fallen, um nicht die für die Thatsachen zu gewinnende mögliche Uebereinstimmung durch Streitigkeiten über abstracte Sätze zu stören, welche in das uns vorliegende Geschäft nicht nothwendig hineingezogen zu werden brauchen.

Ich will hier nur zunächst den Leser vorbereiten auf gewisse allgemeine Eigenthümlichkeiten der in den Sinneswahrnehmungen wirksamen Seelenthätigkeiten, welche uns bei der Behandlung der verschiedenen Gegenstände immer wieder begegnen werden, und in dem einzelnen Falle oft paradox und unglaublich erscheinen, wenn man sich nicht ihre allgemeine Bedeutung und ihre ausgedehnte Wirksamkeit klar gemacht hat.

Die allgemeine Regel, durch welche sich die Gesichtsvorstellungen bestimmen, die wir bilden, wenn unter irgend welchen Bedingungen oder mit Hülfe von optischen Instrumenten ein Eindruck auf das Auge gemacht worden ist, ist die, *dass wir stets solche Objecte als im Gesichtsfelde vorhanden uns vorstellen, wie sie vorhanden sein müssten, um unter den gewöhnlichen normalen Bedingungen des Gebrauchs unserer Augen denselben Eindruck auf den Nervenapparat hervorzubringen.* Um ein Beispiel zu benutzen, von dem wir schon gesprochen haben, nehmen wir an, es sei der Augapfel am äusseren Augenwinkel mechanisch gereizt worden. Wir glauben dann eine Lichterscheinung in der Richtung des Nasenrückens im Gesichtsfelde vor uns zu sehen. Wenn bei dem gewöhnlichen Gebrauche unserer Augen, wo sie durch von aussen kommendes Licht erregt werden, eine Erregung der Netzhaut in der Gegend des äusseren Augenwinkels zu Stande kommen soll, muss in der That das äussere Licht von der Gegend des Nasenrückens her in das Auge fallen. Es ist also der eben aufgestellten Regel gemäss, dass wir in solchem Falle ein lichtes Object in die genannte Stelle des Gesichtsfeldes hinein versetzen, trotzdem der mechanische Reiz hierbei weder von vorn vom Gesichtsfelde her, noch von der Nasenseite des Auges, sondern im Gegentheil von der äusseren Fläche des Augapfels und mehr von hinten her einwirkt. Wir werden im Folgenden die allgemeine Gültigkeit der gegebenen Regel in einer grossen Zahl von Fällen noch kennen lernen.

Dass in der Formulirung jener Regel der gewöhnliche Gebrauch des Auges, wo der Sehnervenapparat von äusserem Lichte erregt wird, und dieses äussere Licht von den undurchsichtigen Körpern, die es zuletzt auf seinem Wege getroffen hat, auf geradem Wege durch eine ununterbrochene Luftschicht in das Auge gelangt ist, als der normale Gebrauch des Organs bezeichnet ist, ist wohl dadurch gerechtfertigt, dass diese Art der Erregung in einer so ungeheuer überwiegenden Zahl von Fällen stattfindet, dass alle anderen Fälle der Erregung, wo brechende oder spiegelnde Flächen den Gang der Lichtstrahlen abändern, oder die Erregungen nicht durch äusseres Licht zu Stande kommen, als seltene Ausnahmen betrachtet werden können. Es ist dies eben dadurch bedingt, dass die Netzhaut im Hintergrund des festen Augapfels vor allen anderen reizenden Einwirkungen ziemlich vollständig geschützt und nur dem äusseren Lichte leicht zugänglich ist. Wenn übrigens die Anwendung eines optischen Instruments, z. B. einer Brille, durch fortdauernden Gebrauch zur Norm gemacht wird, so accommodirt sich auch die Deutung der Gesichtsbilder bis zu einem gewissen Grade diesen veränderten Umständen.

Die aufgestellte Regel entspricht übrigens einer allgemeinen Eigenthümlichkeit aller Sinneswahrnehmungen, nicht blos des Gesichts allein. Die Erregung der Tastnerven z. B. geschieht in der ungeheuer überwiegenden Mehrzahl der Fälle durch Einwirkungen, welche die in der Hautfläche gelegenen Endausbreitungen dieser Nerven treffen; nur ausnahmsweise werden die Stämme durch stärkere Einwirkungen erregt werden können. Unserer oben gegebenen Regel entsprechend, werden deshalb alle Erregungen von Hautnerven, auch wenn sie deren Stamm, oder selbst das centrale Ende treffen, in der Wahrnehmung an die entsprechende peripherische Hautfläche verlegt. Die auffallendsten und überraschendsten Fälle solcher Täuschung sind diejenigen, wo die entsprechende peripherische Hautfläche gar nicht mehr existirt, z. B. bei Leuten, denen ein Bein amputirt ist. Solche glauben oft noch lange Zeit nach der Operation sehr lebhafte Empfindungen in dem abgeschnittenen Fusse zu haben. Sie fühlen genau, welche Stellen dieses oder jenes Zehen schmerzen. Die Erregung kann hier natürlich nur den noch bestehenden Stumpf des Nervenstammes treffen, dessen Fäden ehemals nach den abgeschnittenen Zehen hinliefen, und meistens ist es wohl das Ende des Nerven in der Narbe, welches durch äusseren Druck oder die Contraction des Narbengewebes gereizt wird. Zuweilen werden des Nachts die Empfindungen in der fehlenden Extremität so lebhaft, dass die Leute hinfühlen müssen, um sich zu überzeugen, dass ihre Extremität ihnen wirklich fehlt.

In solchen Fällen ungewöhnlicher Erregungsweise der Sinnesorgane werden also unrichtige Vorstellungen von den Objecten gebildet, und man hat solche Fälle deshalb früher mit dem Namen der Sinnestäuschungen belegt. Es ist klar, dass es in solchen Fällen nicht eine unrichtige Thätigkeit des Sinnesorgans und des dazu gehörigen Nervenapparats ist, welche die Täuschung hervorbringt. Beide können nicht anders als nach den Gesetzen wirken, welche ein für alle Mal ihre Thätigkeit beherrschen. Es ist vielmehr nur eine Täuschung in der Beurtheilung des dargebotenen Materials von Sinnesempfindungen, wodurch eine falsche Vorstellung entsteht.

Die psychischen Thätigkeiten, durch welche wir zu dem Urtheile kommen, dass ein bestimmtes Object von bestimmter Beschaffenheit an einem bestimmten Orte ausser uns vorhanden sei, sind im Allgemeinen nicht bewusste Thätigkeiten, sondern unbewusste. Sie sind in ihrem Resultate einem Schlusse gleich, insofern wir aus der beobachteten Wirkung auf unsere Sinne die Vorstellung von einer Ursache dieser Wirkung gewinnen, während wir in der That direct doch immer nur die Nervenerregungen, also die Wirkungen wahrnehmen können, niemals die äusseren Objecte. Sie erscheinen aber von einem Schlusse — dieses Wort in seinem gewöhnlichen Sinne genommen — dadurch unterschieden, dass ein solcher ein Act des bewussten Denkens ist. Dergleichen wirkliche bewusste Schlüsse sind es zum Beispiel, wenn ein Astronom aus den perspectivischen Bildern, welche ihm die Gestirne in verschiedenen Zeiten und von verschiedenen Punkten der Erdbahn aus dargeboten haben, die Lage derselben im Weltraum, ihre Entfernung von der Erde u. s. w. berechnet. Der Astronom stützt seine Schlüsse auf eine bewusste Kenntniss der Sätze der Optik Eine solche Kenntniss der Optik fehlt bei den gewöhnlichen Acten des Sehens. Indessen mag es erlaubt sein, die psychischen Acte der gewöhnlichen Wahrnehmung als unbewusste Schlüsse zu bezeichnen, da dieser Name sie hinreichend von den gewöhnlich so genannten bewussten Schlüssen unterscheidet, und wenn auch die Aehnlichkeit der psychischen Thätigkeit in beiden bezweifelt worden ist, und vielleicht auch bezweifelt werden wird, doch die Aehnlichkeit der Resultate solcher unbewussten und der bewussten Schlüsse keinem Zweifel unterliegt.

Die bezeichneten unbewussten Schlüsse von der Sinnesempfindung auf deren Ursache sind nun in ihren Resultaten den sogenannten Analogieschlüssen congruent. Weil in einer millionenfachen Ueberzahl von Fällen die Erregung der Netzhautstellen am äusseren Augenwinkel von äusserem Lichte herrührte, welches von der Gegend des Nasenrückens her in das Auge fiel, urtheilen wir, dass es auch in jedem neu eintretenden Falle so sei, wo die genannte Netzhautstelle erregt wird, ebenso, wie wir behaupten, dass jeder einzelne jetzt lebende Mensch sterben werde, weil bisher die Erfahrung ergeben hat, dass alle früher lebenden Menschen gestorben sind.

Jene unbewussten Analogieschlüsse treten aber ferner, eben weil sie nicht Acte des freien bewussten Denkens sind, mit zwingender Nothwendigkeit auf, und ihre Wirkung kann nicht durch bessere Einsicht in den Zusammenhang der Sache aufgehoben werden. Wir mögen noch so gut einsehen, auf welche Weise die Vorstellung von einer Lichterscheinung im Gesichtsfelde zu Stande kommt, wenn das Auge gedrückt wird, doch werden wir dadurch die Ueberzeugung, dass diese Lichterscheinung in der bestimmten Stelle des Gesichtsfeldes vorhanden sei, nicht fortschaffen, und nicht die Anschauung von einer Lichterscheinung am Orte der gereizten Netzhautstelle zu Stande bringen können. Dasselbe ist der Fall bei allen Bildern, welche uns optische Instrumente zeigen.

Obgleich nun andererseits vielfältige Beispiele dafür vorliegen, wie fest und unausweichlich Vorstellungsverbindungen durch häufige Wiederholung werden, selbst wenn sie nicht auf natürlicher Verbindung beruhen, sondern nur auf verabredetem Uebereinkommen z. B. zwischen den geschriebenen Buchstaben eines

Wortes, dem Klange und der Bedeutung desselben, so pflegt doch die Verbindung der Sinnesempfindung mit der Vorstellung vom Objecte derselben vielen Physiologen und Psychologen so fest und zwingend zu erscheinen, dass sie wenig geneigt sind, anzuerkennen, dass diese Verbindung, wenigstens grossentheils, auf erworbener Erfahrung, also auf psychischer Thätigkeit beruhe, dass sie im Gegentheil nach einer mechanischen Entstehungsweise derselben durch vorgebildete organische Structuren suchten. In dieser Beziehung sind nun alle diejenigen Erfahrungen von grosser Bedeutung, welche nachweisen, wie durch Erfahrung und Einübung, die unter veränderten Umständen angestellt sind, die Beurtheilung der Sinnesempfindungen verändert und den neuen Bedingungen angepasst werden kann, so dass man theils lernt, Einzelheiten der Empfindung, die sonst nicht beachtet werden, und keine Anschauung vom Object erzeugen, für eine solche nutzbar zu machen, andererseits auch die neu eintretende Gewöhnung so weit gehen kann, dass das betreffende Individuum in die alten ursprünglich normalen Zustände zurückversetzt nun Sinnestäuschungen anheim fällt.

Dergleichen Thatsachen lassen den ausgedehnten Einfluss erkennen, welchen Erfahrung, Einübung und Gewöhnung auf unsere Wahrnehmungen haben. Wie weit ihr Einfluss aber wirklich geht, dies vollständig und genügend abzugrenzen möchte vor der Hand unmöglich sein; an neugeborenen Kindern und Thieren lässt sich wenig genug ermitteln, und die Deutung der an ihnen gemachten Beobachtungen ist äusserst zweifelhafter Art; ausserdem kann man den Neugebornen nicht einmal Erfahrung und Uebung in Tastempfindungen und Körperbewegungen ganz absprechen. Ich habe deshalb der oben hingestellten Regel eine Form gegeben, welche der Entscheidung dieser Frage nicht vorgreift, und sich nur über das Resultat ausspricht, so dass sie auch von solchen Lesern angenommen werden kann, welche sich ganz andere Ideen über das Zustandekommen der Vorstellungen von Objecten der Aussenwelt machen.

Eine zweite allgemeine Eigenthümlichkeit unserer Sinneswahrnehmungen ist die, dass wir auf unsere Sinnesempfindungen nur so weit leicht und genau aufmerksam werden, als wir sie für die Erkenntniss äusserer Objecte verwerthen können, dass wir dagegen von allen denjenigen Theilen der Sinnesempfindungen zu abstrahiren gewöhnt sind, welche keine Bedeutung für die äusseren Objecte haben, so dass meistentheils eine besondere Unterstützung und Einübung für die Beobachtung dieser letzteren, subjectiven Empfindungen nothwendig ist. Während nichts leichter erscheint, als sich seiner eigenen Sinnesempfindungen bewusst zu werden, lehrt die Erfahrung, dass zur Entdeckung der subjectiven Empfindungen oft genug entweder besonderes Talent nöthig ist, wie es Purkinje im höchsten Grade bewährt hat, oder Zufall, oder theoretische Speculation. So sind zum Beispiel die Erscheinungen des blinden Flecks von Mariotte auf theoretischem Wege gefunden, ebenso von mir im Gebiete des Gehörs die Existenz derjenigen Combinationstöne, welche ich Summationstöne genannt habe. In der überwiegenden Zahl der Fälle ist es wohl der Zufall gewesen, welcher Beobachtern, deren Aufmerksamkeit auf subjective Erscheinungen besonders gerichtet war, bald diese bald jene zugeführt hat; nur da wo die subjectiven Erscheinungen so

intensiv werden, dass sie die Wahrnehmung der Objecte stören, fallen sie allen Menschen auf. Sind die Erscheinungen erst einmal gefunden, so ist es meist leichter auch für andere Beobachter, die sich in die richtigen Bedingungen der Beobachtung setzen, und ihre Aufmerksamkeit darauf richten, sie wahrzunehmen. Aber in vielen Fällen, z. B. bei den Erscheinungen des blinden Flecks, bei der Scheidung der Obertöne und Combinationstöne von den Grundtönen musikalischer Klänge u. s. w. wird eine so angestrengte Anspannung der Aufmerksamkeit verlangt, selbst bei zweckmässig angewendeten äusseren Hülfsmitteln, dass die Versuche vielen Personen nicht gelingen wollen. Selbst die Nachbilder heller Objecte werden von den meisten Personen anfangs nur bei besonders günstigen äusseren Umständen wahrgenommen, erst nach öfterer Uebung lernt man auch die schwächeren Bilder dieser Art sehen. Eine gewöhnlich vorkommende hierher gehörige Erfahrung ist die, dass Leute, welche an irgend welcher Augenkrankheit leiden, die ihnen das Sehen erschwert, plötzlich die fliegenden Mücken bemerken, welche sie schon während ihres ganzen Lebens im Glaskörper gehabt haben, und sich nun fest einbilden, diese Körperchen seien erst seit der Erkrankung ihres Auges aufgetreten, während in der That der Patient durch die Erkrankung auf seine Gesichtserscheinungen nur aufmerksamer geworden ist. Auch kommen wohl Fälle vor von allmäliger Erblindung eines Auges, womit die Patienten eine unbestimmte Zeit herumgegangen sind, ohne es zu bemerken, bis sie zufällig einmal das gesunde Auge allein schliessen, und die Blindheit des anderen bemerken.

Sehr gewöhnlich wundern sich die Leute, welche man zuerst auf die binocularen Doppelbilder aufmerksam macht, ungemein darüber, dass sie sie sonst nicht bemerkt haben, trotzdem sie in jedem Augenblicke ihres Lebens fortdauernd nur eine kleine Zahl von Gegenständen, die ungefähr in gleicher Entfernung vom Auge wie der jedesmalige Fixationspunkt liegen, einfach gesehen haben, die grössere Mehrzahl aber, nämlich sämmtliche ferneren und näheren Gegenstände doppelt.

Wir müssen also erst lernen, unseren einzelnen Empfindungen die Aufmerksamkeit zuzuwenden, und wir lernen dies für gewöhnlich nur für die Empfindungen, die uns als Mittel zur Erkenntniss der Aussenwelt dienen. Nur zu diesem Zwecke haben die Sinnesempfindungen eine Wichtigkeit für uns im gewöhnlichen Leben, die subjectiven Empfindungen sind meist nur für die wissenschaftlichen Untersuchungen interessant; wenn sie beim gewöhnlichen Gebrauche der Sinne bemerkt werden, können sie nur störend eingreifen. Während wir deshalb in der objectiven Beobachtung einen ausserordentlichen Grad von Feinheit und Sicherheit erreichen, erlangen wir diesen für die subjectiven Beobachtungen nicht nur nicht, sondern wir erlangen sogar in einem hohen Grade die Fähigkeit diese zu übersehen, und uns in der Beurtheilung der Objecte von ihnen unabhängig zu erhalten, selbst wo sie sich durch ihre Stärke leicht genug bemerklich machen könnten.

Das allgemeinste Kennzeichen der subjectiven Gesichtserscheinungen scheint namentlich in ihrer Bewegung mit dem Auge zugleich über das Gesichtsfeld hin zu liegen. So bewegen sich die Nachbilder, die fliegenden Mücken, der blinde

Fleck, der Lichtstaub des dunklen Feldes mit dem Auge fort, und decken sich nach einander mit den verschiedensten ruhenden Objecten des Gesichtsfeldes. Wenn dagegen dieselben Erscheinungen immer wieder an denselben Stellen des Gesichtsfeldes auftreten, werden sie für objectiv und den Gegenständen anhaftend gehalten, wie das der Fall ist bei den Contrasterscheinungen, welche durch Nachbilder entstehen.

Dieselbe Schwierigkeit, welche wir finden, Empfindungen subjectiver Art zu beobachten, d. h. solche, welche durch innere Ursachen hervorgerufen sind, dieselbe tritt auch ein, wenn zusammengesetzte Empfindungen, welche stets in derselben Verbindung durch irgend ein einfaches Object erregt werden, in ihre einzelnen Bestandtheile aufgelöst werden sollen. In solchen Fällen lehrt uns die Erfahrung ein zusammengesetztes Aggregat von Empfindungen als das Zeichen für ein einfaches Object kennen, und gewöhnt den Empfindungscomplex als ein zusammengehöriges Ganze zu betrachten, vermögen wir in der Regel nicht ohne äussere Hilfe und Unterstützung uns der einfachen Bestandtheile eines solchen bewusst zu werden. Beispiele dieser Art werden wir im Folgenden viele kennen lernen. Die Wahrnehmung der Richtung zum Beispiel, in welcher sich ein Object vom Auge befindet, beruht auf der Combination derjenigen Empfindungen, nach denen wir die Stellung des Auges beurtheilen, und der Unterscheidung derjenigen Netzhauttheile, welche vom Lichte getroffen sind, von den nicht getroffenen. Die Wahrnehmung der körperlichen Form eines nach drei Dimensionen ausgedehnten Objects beruht auf der Combination zweier verschiedener perspectivischer Ansichten von beiden Augen. Die scheinbar einfache Qualität des Glanzes einer Fläche beruht auf verschiedener Färbung oder Helligkeit ihres Bildes in beiden Augen. Es sind diese Sätze theoretisch gefunden, und können durch passende Versuche erwiesen werden, aber es ist meist sehr schwer, oft unmöglich, durch directe Beobachtung und Analyse der Empfindungen allein dies zu finden. Selbst bei viel zusammengesetzteren Empfindungen, die nur häufig wiederkehrenden zusammengesetzten Objecten entsprechen, wird die Analyse der Empfindung durch blosse Beobachtung desto schwerer, je häufiger dieselbe Zusammensetzung wiedergekehrt ist, und je mehr wir uns gewöhnt haben, sie als das normale Zeichen der wirklichen Beschaffenheit des Objects zu betrachten. Als Beispiel dazu möge die bekannte Erfahrung dienen, dass die Farben einer Landschaft viel glänzender und bestimmter heraustreten, wenn man sie bei schiefer oder umgekehrter Lage des Kopfes betrachtet, als bei der gewöhnlichen aufrechten Haltung. Bei der gewöhnlichen Art der Beobachtung suchen wir nur die Objecte als solche richtig zu beurtheilen. Wir wissen, dass grüne Flächen von einer gewissen Entfernung in etwas verändertem Farbenton erscheinen; wir gewöhnen uns von dieser Veränderung abzusehen, und lernen das veränderte Grün ferner Wiesen und Bäume doch mit der entsprechenden Farbe naher Objecte zu identificiren. Bei sehr fernen Objecten, fernen Bergreihen bleibt von der Körperfarbe wenig zu erkennen, sie wird meist durch die Farbe der erleuchteten Luft überdeckt. Diese unbestimmt blaugraue Farbe, an welche nach oben das helle blaue Feld des Himmels oder das rothgelbe der Abendbeleuchtung, nach unten das lebhafte

Grün der Wiesen und Wälder grenzt, ist Veränderungen durch den Contrast sehr ausgesetzt. Es ist für uns die unbestimmte und wechselnde Farbe der Ferne, deren Unterschied zu verschiedenen Zeiten und bei verschiedenen Beleuchtungen wir wohl genauer beachten, während wir ihre wahre Beschaffenheit nicht bestimmen, da wir sie auf kein bestimmtes Object zu übertragen haben, und wir eben ihre wechselnde Beschaffenheit kennen. So wie wir uns aber in ungewöhnliche Umstände versetzen, z. B. unter dem Arme oder zwischen den Beinen durchsehen, so erscheint uns die Landschaft als ein plattes Bild, theils wegen der ungewöhnlichen Lage ihres Bildes im Auge, theils weil die binoculare Beurtheilung der Entfernung, wie wir unten sehen werden, ungenauer wird. Ja es kommt wohl vor, dass bei umgekehrtem Kopfe die Wolken richtige Perspective bekommen, während die Objecte der Erde als ein Gemälde auf senkrechter Fläche erscheinen, wie sonst die Wolken am Himmel. Damit verlieren auch die Farben ihre Beziehung zu nahen oder fernen Objecten, und treten uns nun rein in ihren eigenthümlichen Unterschieden entgegen [1]. Da erkennen wir denn ohne Mühe, dass das unbestimmte Blaugrau der weiten Ferne oft ziemlich gesättigtes Violett ist, dass das Grün der Vegetation stufenweise durch Blaugrün und Blau in jenes Violett übergeht u. s. w. Dieser ganze Unterschied scheint mir nur darauf zu beruhen, dass wir die Farben nicht mehr als Zeichen für die Beschaffenheit von Objecten betrachten, sondern nur noch als verschiedene Empfindungen, und wir deshalb ihre eigenthümlichen Unterschiede, unbeirrt durch andere Rücksichten genauer auffassen.

Wie sehr wir durch die Beziehung der Empfindungen auf äussere Objecte an der Perception der einfachsten Verhältnisse der Empfindungen selbst gestört werden, wird sich namentlich auch in der Schwierigkeit zeigen, mit der wir die binocularen Doppelbilder wahrnehmen, wenn dieselben als Bilder ein und desselben äusseren Objects aufgefasst werden können.

Die gleichen Erfahrungen können wir im Gebiete anderer Sinnesempfindungen in gleicher Weise machen. Die Empfindung der Klangfarbe eines Schalls ist, wie ich anderwärts [2] gezeigt habe, zusammengesetzt aus einer Reihe von Empfindungen seiner einzelnen Partialtöne (Grundton und harmonische Obertöne), aber es ist ausserordentlich schwer, die zusammengesetzte Empfindung des Klanges in diese ihre Bestandtheile aufzulösen. Die Tastempfindung des Nassen ist zusammengesetzt aus der der Kälte und des leichten Gleitens über die Oberfläche. Wenn wir deshalb unvermuthet ein kaltes glattes Metallstück berühren, glauben wir oft etwas Nasses berührt zu haben. Beispiele dieser Art würden sich noch viele häufen lassen. Sie alle zeigen, dass wir ausserordentlich gut eingeübt sind, aus unseren Sinnesempfindungen die objectiven Beschaffenheiten der Objecte der Aussenwelt zu ermitteln, in der Beobachtung unserer Empfindungen an sich aber vollständig ungeübt, und dass uns die eingeübte Beziehung auf die Aussenwelt sogar hindert, die reinen Empfindungen uns deutlich zum Bewusstsein zu bringen.

---

[1] Dieselbe Erklärung bei O. N. Rood, in *Silliman Journal* (2) XXXII. p. 184—185. 1861.
[2] Helmholtz, die Lehre von den Tonempfindungen. Braunschweig. 1862.

Auch ist dies nicht blos für die qualitativen Unterschiede der Empfindung geltend, es gilt ebenso für die Wahrnehmung räumlicher Verhältnisse. Die Bewegung eines gehenden Menschen zum Beispiel ist uns ein vertrauter und gewohnter Anblick. Wir betrachten sie als zusammenhängendes Ganze, und werden uns höchstens ihrer auffallendsten Einzelheiten bewusst. Es gehört grosse Aufmerksamkeit dazu, und eine besondere Wahl des Gesichtspunkts, um die senkrechten und seitlichen Schwankungen des Körpers eines Gehenden zu erkennen. Wir müssen passend gelegene Punkte oder Linien des Hintergrunds wählen, mit dem wir die Lage seines Kopfes vergleichen. Man betrachte aber einmal ferne gehende Menschen durch ein astronomisches Fernrohr, welches umgekehrte Bilder zeigt, welch ein seltsames Hüpfen und Wiegen des Körpers die Gehenden hervorbringen. Dabei hat man gar keine Schwierigkeiten mehr, die einzelnen Schwankungen des Körpers und manche andere Einzelheiten des Ganges, namentlich auch die individuellen Verschiedenheiten und deren Grund zu erkennen, nur weil dieser Anblick nicht mehr der alltäglich gewohnte ist. Dagegen tritt im umgekehrten Bilde der Charakter des Ganges, ob er leicht oder schwerfällig, würdevoll oder anmuthig ist, nicht mehr so gut hervor, wie im aufrechten.

Es kann unter diesen Umständen oft recht schwer werden, zu beurtheilen, was in unseren durch den Gesichtssinn gewonnenen Anschauungen unmittelbar durch die Empfindung, und was im Gegentheil durch Erfahrung und Einübung bedingt ist. An diese Schwierigkeit knüpft sich auch der hauptsächlichste principielle Gegensatz, welcher zwischen verschiedenen Forschern in diesem Gebiete besteht. Die einen sind geneigt, dem Einfluss der Erfahrung einen möglichst breiten Spielraum einzuräumen, namentlich alle Raumanschauung daraus herzuleiten; wir können diese Ansicht als die empiristische Theorie bezeichnen. Die andern müssen allerdings den Einfluss der Erfahrung für eine gewisse Reihe von Wahrnehmungen zugeben, glauben aber für gewisse bei allen Beobachtern gleichförmig eintretende elementare Anschauungen ein System von angeborenen und nicht auf Erfahrung begründeten Anschauungen, namentlich der Raumverhältnisse, voraussetzen zu müssen. Wir dürfen diese letztere Ansicht im Gegensatz zur ersteren wohl als die nativistische Theorie der Sinneswahrnehmungen bezeichnen.

In diesem Streite sind, wie ich glaube, folgende Grundsätze festzuhalten.

Wenn wir den Namen der Vorstellung beschränken auf das Erinnerungsbild von Gesichtsobjecten, welches von keinen gegenwärtigen sinnlichen Empfindungen begleitet ist, den der Anschauung auf die von den bezüglichen sinnlichen Empfindungen begleitete Wahrnehmung, den der Perception auf eine solche Anschauung, in der nichts enthalten ist, was nicht aus den unmittelbar gegenwärtigen sinnlichen Empfindungen hervorgeht, also eine Anschauung, wie sie auch ohne alle Erinnerung an früher Erfahrenes sich bilden könnte, so ist zunächst klar, dass ein und dieselbe Anschauung in sehr verschiedenem Maasse von den entsprechenden sinnlichen Empfindungen begleitet sein kann, dass also Vorstellung und Perception in den verschiedensten Verhältnissen sich zur Anschauung verbinden können.

Wenn ich mich in einem bekannten Zimmer befinde bei hellem Sonnenschein, so habe ich eine von sehr energischen Empfindungen reichlich begleitete Anschauung. In demselben Raum werde ich Abends in der Dämmerung nur die helleren Objecte erkennen können, namentlich die Fenster, aber was ich wirklich noch erkenne, schmilzt mit meinen Gedächtnissbildern, die das Zimmer betreffen, so zusammen, dass ich immer noch im Stande sein werde, mich in demselben sicher umher zu bewegen und Gegenstände, die ich suche, zu finden, selbst wenn ich von ihnen nur ein schattenhaftes Bild erhaschen kann, was ohne meine vorgängige Kenntniss durchaus ungenügend wäre, sie zu erkennen. Endlich kann ich mich in demselben Raume in absolutem Dunkel befinden, und mich doch, vermöge der Erinnerung an die früher von ihm erhaltenen Gesichtsbilder in ihm zurecht finden, so dass das Anschauungsbild durch immer weitere Beschränkung des sinnlichen Materials endlich auf das reine Vorstellungsbild zurückgeführt werden und in dieses allmälig übergehen kann. Meine Bewegungen werden allerdings um so unsicherer, meine Anschauung um so ungenauer werden, je mehr das sinnliche Material entzogen wird, indessen wird kein eigentlicher Sprung stattfinden, sondern Empfindung und Erinnerung werden sich fortdauernd ergänzen, nur in verschiedenem Maasse.

Aber selbst, wenn wir ein solches Zimmer bei vollem Sonnenschein beschauen, so zeigt eine leichte Ueberlegung, dass auch dann ein grosser Theil unseres Anschauungsbildes auf Momenten der Erinnerung und Erfahrung beruhen mag. Unsere Gewöhnung an die perspectivischen Verziehungen der Bilder parallelepipedischer Körper und an die Form der Schlagschatten ist bei der Beurtheilung seiner Form und Grösse von beträchtlichem Einflusse, wie wir später sehen werden. Schliessen wir, während wir das Zimmer betrachten, ein Auge, so glauben wir es nicht weniger deutlich und bestimmt vor uns zu sehen, als mit zwei Augen, und doch würde uns nun genau dasselbe Gesichtsbild gegeben werden, wenn alle Punkte des Zimmers so verschoben würden. dass sie ihre Entfernung vom Auge beliebig änderten, aber auf denselben Visirlinien blieben.

Während wir also in Wahrheit in einem solchen Falle eine äusserst vieldeutige sinnliche Erscheinung vor uns haben, geben wir ihr doch eine ganz bestimmte Auslegung, und es ist gar nicht leicht, sich dessen bewusst zu werden, dass das einäugige Bild eines solchen wohlbekannten Gegenstandes eine viel mangelhaftere Wahrnehmung bedingt, als das der beiden Augen. So ist es auch, wenn ungeübte Beobachter stereoskopische Photographien betrachten, oft genug schwer herauszubringen, ob sie die eigenthümliche Täuschung, die das Instrument giebt, erkennen oder nicht.

Wir sehen also, wie hiebei die Erinnerungsbilder aus früheren Erfahrungen zusammenwirken mit gegenwärtigen Sinnesempfindungen, um ein Anschauungsbild hervorzubringen, welches sich unserem Wahrnehmungsvermögen mit zwingender Kraft aufdrängt, ohne dass darin für das Bewusstsein sich trennt, was durch Erinnerung, was durch gegenwärtige Wahrnehmung gegeben ist.

Noch schlagender ist der Einfluss des Verständnisses der Sinnesempfindungen, wenn in einzelnen Fällen, namentlich bei unvollkommener Beleuchtung ein Ge-

sichtsbild im Anfange unverständlich ist, weil wir ihm nicht die richtigen Tiefendimensionen zu geben wissen, wenn wir z. B. irgend ein fernes Licht für nah, oder ein nahes für fern halten. Plötzlich fällt uns ein, was es ist, sogleich entwickelt sich unter dem Einflusse des richtigen Verständnisses auch das richtige Anschauungsbild in seiner vollen Energie, und wir sind nicht im Stande, von diesem zu der früheren unvollkommenen Anschauung zurückzukehren.

Sehr häufig kommt dies namentlich bei complicirten stereoskopischen Zeichnungen von Krystallformen und anderen vor, die in vollkommener sinnlicher Klarheit zur Anschauung kommen, sobald es gelungen ist, das richtige Verständniss erst einmal zu gewinnen.

Dergleichen Erfahrungen, die jeder Leser gelegentlich gemacht haben wird, beweisen, dass die aus der Erfahrung hergeleiteten Momente in den Sinneswahrnehmungen sich mit eben solcher zwingenden Kraft geltend machen können, wie die aus gegenwärtigen Empfindungen hergeleiteten, und es ist dies auch von allen den Beobachtern, die sich eingehend mit der Theorie der Sinneswahrnehmungen beschäftigt haben, immer eingeräumt worden, selbst von denen, welche geneigt sind, der Erfahrung so wenig Spielraum, als möglich, einzuräumen.

Daher muss jedenfalls die Möglichkeit zugegeben werden, dass auch in dem, was dem Erwachsenen als unmittelbare sinnliche Anschauung erscheint, noch eine Menge von einzelnen Momenten stecken, die in der That Product der Erfahrung sind, obgleich es vorläufig schwer ist, hier die Grenze zu ziehen.

Ich glaube nun, dass unsere bisherigen Erfahrungen uns berechtigen, den Satz aufzustellen, dass keine unzweifelhaft gegenwärtige Empfindung durch einen Act des Verständnisses beseitigt und überwunden werden kann, sondern wenn wir auch noch so gut erkennen, dass dieselbe auf irgend eine anomale Weise zu Stande gekommen sei, so schwindet doch die Sinnestäuschung nicht durch das Verständniss des Vorgangs. Wir können die Aufmerksamkeit von Empfindungen ablenken, namentlich, wenn es schwache und gewohnte Empfindungen sind, aber so wie wir auf diejenigen Verhältnisse der Aussenwelt merken, die mit diesen Empfindungen in Verbindung stehen, werden wir gezwungen sein, dieselben zu bemerken. So können wir die Temperaturempfindung unserer Haut, wenn sie nicht sehr lebhaft ist, und die Berührungsempfindungen, welche unsere Kleider verursachen, vergessen, so lange wir uns mit ganz anderen Dingen beschäftigen. So wie wir aber unsere Aufmerksamkeit darauf lenken, ob es warm oder kalt sei, werden wir nicht im Stande sein, das Gefühl von Wärme in das von Kälte zu verwandeln, etwa, weil wir wissen, dass es herrührt von anstrengender Bewegung und nicht von der Temperatur der uns umgebenden Luft. Ebenso wenig schwindet der Lichtschein beim Druck auf das Auge durch bessere Einsicht in das Wesen des Processes, vorausgesetzt, dass wir unsere Aufmerksamkeit dem Gesichtsfelde zugewendet haben, und nicht etwa dem Ohre oder der Haut.

Andererseits können wir auch vielleicht nicht im Stande sein, einen Empfindungseindruck zu isoliren, weil er eingeht in das zusammengesetzte sinnliche Zeichen eines äusseren Objects. Dann zeigt aber die richtige Auffassung

des Objects, dass die betreffende Empfindung percipirt und vom Bewusstsein verwendet worden ist.

Ich schliesse daraus, dass nichts in unseren Sinneswahrnehmungen als Empfindung anerkannt werden kann, was durch Momente, die nachweisbar die Erfahrung gegeben hat, im Anschauungsbilde überwunden und in sein Gegentheil verkehrt werden kann.

Was also durch Erfahrungsmomente überwunden werden kann, werden wir selbst als Product der Erfahrung und Einübung zu betrachten haben. Es wird sich zeigen, dass wenn wir dieser Regel folgen, nur die Qualitäten der Empfindung als wirkliche reine Empfindung zu betrachten sind, bei weitem die meisten Raumanschauungen aber als Product der Erfahrung und Einübung.

Dagegen folgt nicht, dass Anschauungen, die gegen unsere bessere bewusste Einsicht Stand halten und uns als Sinnestäuschungen stehen bleiben, nicht doch auf Erfahrung und Einübung beruhen könnten. Unsere Kenntniss der Farbenveränderungen, welche die Trübung der Luft an fernen Gegenständen hervorbringt, der perspectivischen Verziehungen und des Schlagschattens beruht unzweifelhaft auf Erfahrung, und doch werden wir vor einem guten Landschaftsbilde den vollkommenen sinnlichen Eindruck der Ferne und der körperlichen Gestalt darauf befindlicher Gebäude haben, trozdem wir wissen, dass alles auf die Leinwand gezeichnet ist.

Ebenso ist unsere Kenntniss des zusammengesetzten Klangs der Vocale jedenfalls aus der Erfahrung entnommen, und doch bekommen wir den sinnlichen Eindruck des Vocalklangs durch Zusammensetzung von einzelnen Stimmgabeltönen, wie ich dies gezeigt habe, und fassen den Klang als ein Ganzes, obgleich wir wissen, dass er in diesem Falle wirklich zusammengesetzt ist.

Hier ist nun noch zu erläutern, wie Erfahrung gegen Erfahrung auftreten, und wie Täuschung hervorgebracht werden könne durch Momente, die aus der Erfahrung hergeleitet sind, da es scheinen möchte, als könnte die Erfahrung uns nur Wahres lehren. In dieser Beziehung müssen wir näher begrenzen, was oben schon angedeutet wurde, dass wir nämlich die Sinnesempfindungen so auslegen, wie sie bei ihrer normalen Erregungsweise und beim normalen Gebrauche der Sinnesorgane entstehen.

Wir überlassen uns nämlich nicht nur passiv den auf uns eindringenden Eindrücken, sondern wir beobachten, das heisst wir bringen unsere Organe in diejenigen Bedingungen, unter denen sie die Eindrücke am genausten unterscheiden können. Bei der Betrachtung eines complicirten Objects zum Beispiel richten wir nach einander unsere beiden möglichst gut accommodirten Augen so, dass beide stets denjenigen Punkt, der unsere Aufmerksamkeit gerade auf sich lenkt, fixiren, das heisst auf der Stelle des deutlichsten Sehens abbilden, und lassen die Augen nach einander über alle bemerkenswerthen Punkte des Objects wandern. Kommt es uns auch noch darauf an, die Gesammtgestalt des Objects und die Verhältnisse seiner Dimensionen möglichst gut aufzufassen, so stellen wir uns so auf, dass wir ohne Bewegung des Kopfes mit den Blicken die ganze Fläche überlaufen können, und dass ausserdem diejenigen Dimensionen, welche wir vergleichen wollen, möglichst symmetrisch gesehen werden. Wenn

wir also ein Object, welches, wie zum Beispiel ein Gebäude, überwiegend horizontale und verticale Linien darbietet, betrachten wollen, so stellen wir uns ihm nicht leicht anders, als so gegenüber, dass die Verbindungslinie der Drehungspunkte unserer Augäpfel horizontal liegt. Diese Stellung unserer Augen können wir jeden Augenblick controlliren, indem wir Doppelbilder auseinanderschieben; diese liegen in dem genannten Falle horizontal neben einander.

Wir wählen solche bestimmte Art zu sehen, unzweifelhaft, weil wir in dieser Weise am genausten beobachten und vergleichen können, und lernen demnach bei dieser Anwendung der Augen, die wir die normale nennen können, am besten unsere Sinnesempfindungen mit der Wirklichkeit vergleichen, und erhalten durch diese Methode also auch die richtigsten und genauesten Wahrnehmungen.

Wenn wir nun einmal aus Zwang oder Absicht eine andere Art des Betrachtens der Objecte anwenden, sie also entweder nur indirect erblicken mit den Seitentheilen der Netzhaut, oder nicht mit beiden Augen fixiren, oder mit dem Blicke nicht wandern, oder eine ungewöhnliche Kopfhaltung anwenden, so sind wir nicht im Stande, ebenso genaue Anschauungen zu bilden, wie beim normalen Gebrauche der Augen, und wir sind in solchem Falle in der Auslegung des Gesehenen nicht so geübt, wie in dem früheren Falle. Dadurch entsteht ein grösserer Spielraum in der Deutung, während wir doch in der Regel uns diese Unsicherheit in der Auslegung unserer Sinneswahrnehmungen nicht klar machen. Wenn wir ein Gesichtsobject vor uns sehen, so müssen wir es in irgend eine bestimmte Stelle des Raums versetzen, wir können es nicht so anschauen, dass seine Lage zwischen verschiedenen Stellen des Raums zweifelhaft bliebe. Wenn nun keine Erinnerungen uns zu Hilfe kommen, so pflegen wir die Erscheinung so zu deuten, wie sie gedeutet werden müsste, wenn wir bei der normalen und genausten Art des Beobachtens denselben Eindruck erhalten hätten. So treten also gewisse Täuschungen in der Wahrnehmung ein, wenn wir den Blick den beachteten Gegenständen nicht zuwenden, sondern sie im seitlichen Theile des Gesichtsfeldes haben, oder wenn wir den Kopf sehr schief halten, oder wenn wir das Object nicht mit beiden Augen zugleich fixiren. Es ist ferner die Uebereinstimmung der Bilder auf beiden Netzhäuten am constantesten und regelmässigsten, wenn wir ferne Objecte betrachten, und der Umstand, dass wir dabei in der Regel den horizontalen Fussboden im untern Theile des Gesichtsfeldes haben, scheint die Vergleichung der Sehfelder beider Augen in eigenthümlicher Weise zu beeinflussen. So beurtheilen wir die Lage naher Objecte nicht ganz richtig, wenn wir sie mit merklich nach oben und unten geneigten Blicken betrachten, sondern deuten die dargebotenen Netzhautbilder dann gerade so, als wären sie bei geradeaus gerichteten Blicken entstanden, und so fort. Beispiele dieser Art werden wir viele finden. Wir sind eben auf die Deutung der Perceptionen nicht bei jeder Richtung der Augen gleich gut eingeübt, sondern nur für diejenigen, welche die genauesten und in sich am besten übereinstimmenden Wahrnehmungen erlauben, und übertragen auf alle Fälle, was wir in den letztgenannten Fällen gelernt haben.

Nun ist nicht selten die Aehnlichkeit eines solchen Gesichtseindruckes mit einem der möglichen Eindrücke des normalen Beobachtens nicht so überwiegend

und schlagend, dass nicht mehrfache andere Vergleichungen und dem entsprechende Deutungen jenes Eindrucks möglich wären. In solchen Fällen schwankt die Auslegung entweder so, dass derselbe Beobachter nach einander bei unveränderten Netzhautbildern verschiedene Anschauungsbilder vor sich sieht, in welchem Falle das Schwanken leicht zu erkennen ist, oder so, dass der eine Beobachter mehr der einen Vergleichung und Deutung zuneigt, ein anderer der anderen. Durch diesen Umstand ist viel Streit entstanden in der physiologischen Optik, weil jeder Beobachter geneigt war, seine Anschauung, die er bei möglichst sorgfältiger Beobachtung erhielt, für die allein gültige zu halten. Wenn wir aber zu den Beobachtern das Vertrauen haben dürfen, dass sie sorgfältig und ohne Voreingenommenheit beobachtet haben und zu beobachten verstanden, so müssen wir in solchen Fällen nicht eine von den sich entgegenstehenden Deutungen der Gesichtserscheinung als die allein richtige festhalten, wozu namentlich diejenigen geneigt sind, welche die Entstehung der Anschauungsbilder hauptsächlich aus angeborenen Momenten herzuleiten suchen. Man muss vielmehr als Thatsache anerkennen, dass verschiedene Anschauungsbilder in einem solchen Falle entwickelt werden können, und vielmehr nach den Umständen suchen, die die Entscheidung für das eine oder andere geben.

Freilich stossen wir hier auf eine Schwierigkeit, die in den andern Theilen der Naturwissenschaften nicht besteht; wir sind nämlich in vielen solchen Fällen durchaus auf die Aussagen der einzelnen Beobachter beschränkt, ohne im Stande zu sein, sie durch eigne Beobachtung zu controlliren. Es zeigen sich in diesem Gebiete eine Menge Eigenthümlichkeiten, vielleicht zum Theil durch den Bau der Augen, zum Theil durch die gewöhnte Art, die Augen zu gebrauchen, zum Theil auch wohl durch frühere Eindrücke und Anschauungen bedingt. Solche Eigenthümlichkeiten und ihre Folgen kann natürlich nur der beobachten, der sie besitzt, und kein anderer kann darüber absprechen. Andererseits ist das Beobachten in diesem Gebiete gar nicht so leicht, wie man zunächst meinen möchte. Selbst nur das feste Fixiren eines Punktes für längere Zeit, während man im indirecten Sehen beobachtet, die Beherrschung der Aufmerksamkeit, die Abstraction von den gewöhnlichen objectiven Deutungen des Sinneseindrucks, die Schätzung der Farbenunterschiede und der räumlichen Unterschiede im Gesichtsfelde, Alles diess erfordert grosse Uebung und eine Menge der hierher gehörigen Thatsachen können deshalb nicht einmal ohne vorgängige lange Uebung in physiologisch-optischen Beobachtungen beobachtet werden, selbst nicht von Männern, die in anderen Arten von Beobachtungen wohl geübt sind. In vielen Punkten ist man also auf die Beobachtungen sehr weniger Individuen reducirt, und es wird deshalb bei abweichenden Beobachtungsresultaten eines Andern in diesem Gebiete viel schwerer, als in irgend einem andern, richtig zu beurtheilen, ob bei einer solchen Beobachtung nicht Nebeneinflüsse mitgewirkt haben. Ich muss deshalb den Leser von vorn herein darauf aufmerksam machen, dass möglicher Weise Vieles, was er in den folgenden Kapiteln etwa Neues finden wird, auf individuellen Eigenthümlichkeiten meiner eigenen Augen beruhen mag, und ich konnte unter diesen Umständen eben nichts thun, als die Thatsachen, wie sie meine eigenen Augen mir zeigen, möglichst sorgfältig beobachten und

ihren Zusammenhang zu ermitteln suchen. Wo andere Beobachter abweichendes gefunden haben, habe ich es bemerkt. Wie weit verbreitet aber die eine oder andere Art des Sehens sei, wird erst die Zukunft lehren können.

Je weniger ähnlich übrigens die Gesichtseindrücke den normal vorkommenden sind, desto schwankender wird der Regel nach ihre Deutung, was bei der von mir durchgeführten Ansicht sich als eine natürliche Consequenz ergiebt und wesentlich charakteristisch für die Wirksamkeit psychischer Einflüsse ist.

Da wir überhaupt bisher von der Natur der psychischen Vorgänge so gut, wie nichts wissen, sondern nur eine Reihe von Thatsachen kennen, wird es nicht auffallen, wenn wir auch von der Entstehung des Sinneswahrnehmungen keine wirkliche Erklärung geben können. Die empiristische Theorie sucht nachzuweisen, dass zu ihrer Entstehung wenigstens keine andern Kräfte nöthig sind, als die bekannten Fähigkeiten unserer Seele, wenn auch diese selbst dabei ganz unerklärt bleiben. Da es im Allgemeinen eine zweckmässige Regel für die naturwissenschaftliche Forschung ist, keine neuen Hypothesen zu machen, so lange die bekannten Thatsachen zur Erklärung ausreichend erscheinen und die Nothwendigkeit neuer Annahmen nicht erwiesen ist, so habe ich geglaubt, die empiristische Ansicht im Wesentlichen bevorzugen zu müssen. Die nativistische Theorie giebt noch weniger eine Erklärung für die Entstehung unserer Anschauungsbilder, indem sie mitten hineinspringt in die Sache mit der Annahme, dass gewisse räumliche Anschauungsbilder direct erzeugt würden durch einen angeborenen Mechanismus, wenn gewisse Nervenfasern gereizt würden. In den älteren Formen dieser Theorie wurde eine Selbstbeobachtung der Netzhaut vorausgesetzt, indem wir von der Form dieser Membran und der Lage der einzelnen Nervenenden in ihr angeborene Kenntniss haben sollten. In der neueren, namentlich von E. Hering durchgeführten Form dieser Ansicht ist es ein vorgestellter subjectiver Sehraum, in welchen die Empfindungen der einzelnen Netzhautfasern nach gewissen angeborenen Gesetzen eingetragen werden sollen. In dieser Theorie ist also nicht blos die Kant'sche Behauptung festgehalten, dass die allgemeine Raumanschauung eine ursprüngliche Form unseres Vorstellens sei, sondern es sind gewisse specielle Raumanschauungen als angeboren vorausgesetzt.

Die naturalistische Ansicht ist auch wohl specieller Identitätstheorie genannt worden, weil in ihr die vollständige Verschmelzung der Eindrücke der correspondirenden Stellen beider Netzhäute behauptet werden muss. Die empiristische Theorie dagegen ist als Projectionstheorie bezeichnet, weil nach derselben die Anschauungsbilder der Objecte mittels psychischer Vorgänge in den Raum projicirt werden. Ich möchte den Namen vermeiden, weil vielfach sowohl von Anhängern als Gegnern ungebührliche Wichtigkeit darauf gelegt worden ist, dass diese Projection in Richtung der Richtungslinien geschehen sollte, was jedenfalls nicht die richtige Bezeichnung des psychischen Vorgangs war, und auch, wenn man diese Construction nur für die physiologische Beschreibung des Vorgangs gelten lassen wollte, in sehr vielen Fällen unrichtig sein würde.

Ich erkenne an, dass bei dem gegenwärtigen Stande der Wissenschaft eine Widerlegung der nativistischen Theorie nicht möglich ist; ich selbst bevorzuge die entgegengesetzte Ansicht, weil die nativistische Theorie meines Erachtens:

1) eine nicht nothwendige Hypothese einführt,
2) ihre Consequenzen bisher noch immer räumliche Anschauungsbilder ergeben, die nur in den wenigsten Fällen mit der Wirklichkeit und unseren unzweifelhaft vorhandenen richtigen Gesichtsbildern von derselben übereinstimmen, wie sich dies später im Einzelnen zeigen wird. Die Anhänger dieser Theorie sind

deshalb gezwungen, die sehr missliche Annahme zu machen, dass die nach ihnen vorhandenen ursprünglichen Raumempfindungen fortdauernd durch unsere aus der Erfahrung gesammelten Kenntnisse verbessert und überwunden werden. Nach der Analogie aller anderen Erfahrungen müssten wir aber erwarten, dass die überwundenen Empfindungen dann wenigstens der Anschauung gegenwärtig blieben, wenn auch als anerkannte Trugbilder. Das ist aber nicht der Fall,

3) ist nicht einzusehen, was die Annahme solcher ursprünglicher „Raumempfindungen" helfen solle zur Erklärung unserer Gesichtswahrnehmungen, wenn schliesslich von den Anhängern dieser Theorie für die ungeheure Mehrzahl der Fälle angenommen werden muss, dass dieselben überwunden werden müssen durch unsere aus der Erfahrung entnommene bessere Kenntniss. Dann ist es doch, wie mir scheint, viel leichter und einfacher zu begreifen, dass sämmtliche räumliche Anschauungen blos durch die Erfahrung zu Stande kommen, ohne dass diese gegen angeborene, der Regel nach falsche, Anschauungsbilder zu kämpfen hat.

Dies zur Rechtfertigung meines Standpunkts. Da ein solcher doch gewählt werden musste, um wenigstens übersichtliche Ordnung in das Chaos der Erscheinungen bringen zu können, glaubte ich den gewählten bevorzugen zu müssen, ich hoffe jedoch, dass derselbe keinen Einfluss auf die treue Beobachtung und Beschreibung der Thatsachen gehabt hat.

Um Missverständnisse meiner Meinung zu verhüten, und dem natürlichen Bewusstsein derjenigen Leser, welche über ihre Sinneswahrnehmungen noch nicht reflectirt haben, dieselbe zugänglicher zu machen, lasse ich noch folgende Erläuterungen folgen.

Ich habe oben die Sinnesempfindungen nur als Symbole für die Verhältnisse der Aussenwelt bezeichnet und ihnen jede Art der Aehnlichkeit oder Gleichheit mit dem, was sie bezeichnen, abgesprochen. Wir rühren damit an die viel bestrittene Frage, wie weit unsere Vorstellungen überhaupt mit ihren Objecten übereinstimmen, ob sie, wie man es ausdrückte, wahr oder falsch seien. Eine solche Uebereinstimmung ist bald behauptet worden, bald geleugnet. Man nahm ihr zu Liebe eine prästabilirte Harmonie zwischen der Natur und dem Geiste an, oder man behauptete die Identität der Natur und des Geistes, indem man die Natur als Product der Thätigkeit eines allgemeinen Geistes ansah, dessen Ausfluss andererseits wieder der menschliche Geist sein sollte. Diesen Ansichten schliesst sich die nativistische Theorie der Raumanschauungen insofern an, als sie durch einen angeborenen Mechanismus und eine gewisse prästabilirte Harmonie Anschauungsbilder entstehen lässt, die, wenn auch in ziemlich unvollkommener Weise, der Wirklichkeit entsprechen sollen.

Oder aber man leugnete die Uebereinstimmung der Vorstellungen mit ihrem Objecte, und erklärte dieselben deshalb für Täuschungen, womit man denn consequenter Weise auch die Möglichkeit alles Wissens von irgend welchen Objecten leugnen musste. So bei den englischen Sensualisten des vorigen Jahrhunderts. Ich will übrigens hier nicht auf die Auseinandersetzung der Meinungen der einzelnen Philosophenschulen über diese Frage eingehen, weil das ein für diesen Ort viel zu weitläufiges Geschäft wäre, sondern mich darauf beschränken zu erörtern, wie sich meines Erachtens nach der Naturforscher diesen Streitigkeiten gegenüber zu verhalten hat.

Unsere Anschauungen und Vorstellungen sind Wirkungen, welche die angeschauten und vorgestellten Objecte auf unser Nervensystem und unser Bewusstsein hervorgebracht haben. Jede Wirkung hängt ihrer Natur nach ganz nothwendig ab

sowohl von der Natur des Wirkenden, als von der desjenigen, auf welches gewirkt wird. Eine Vorstellung verlangen, welche unverändert die Natur des Vorgestellten wiedergäbe, also in absolutem Sinne wahr wäre, würde heissen eine Wirkung zu verlangen, welche vollkommen unabhängig wäre von der Natur desjenigen Objects, auf welches eingewirkt wird, was ein handgreiflicher Widerspruch wäre. So sind also unsere menschlichen Vorstellungen und so werden alle Vorstellungen irgend eines intelligenten Wesens, welches wir uns denken können, Bilder der Objecte sein, deren Art wesentlich mitabhängt von der Natur des vorstellenden Bewusstseins und von deren Eigenthümlichkeiten mitbedingt ist.

Ich meine daher, dass es gar keinen möglichen Sinn haben kann, von einer anderen Wahrheit unserer Vorstellungen zu sprechen, als von einer praktischen. Unsere Vorstellungen von den Dingen können gar nichts anderes sein, als Symbole, natürlich gegebene Zeichen für die Dinge, welche wir zur Regelung unserer Bewegungen und Handlungen benutzen lernen. Wenn wir jene Symbole richtig zu lesen gelernt haben, so sind wir im Stande, mit ihrer Hilfe unsere Handlungen so einzurichten, dass dieselben den gewünschten Erfolg haben, d. h. dass die erwarteten neuen Sinnesempfindungen eintreten. Eine andere Vergleichung zwischen den Vorstellungen und den Dingen giebt es nicht nur in der Wirklichkeit nicht — darüber sind alle Schulen einig — sondern eine andere Art der Vergleichung ist gar nicht denkbar und hat gar keinen Sinn. Dies letztere ist der Punkt, auf den es ankommt, und den man einsehen muss, um aus dem Labyrinthe widerstreitender Meinungen herauszukommen. Zu fragen, ob die Vorstellung, welche ich von einem Tische, seiner Gestalt, Festigkeit, Farbe, Schwere u. s. w. habe, an und für sich, abgesehen von dem praktischen Gebrauche, den ich von dieser Vorstellung machen kann, wahr sei und mit dem wirklichen Dinge übereinstimme, oder ob sie falsch sei und auf einer Täuschung beruhe, hat gerade so viel Sinn, als zu fragen, ob ein gewisser Ton roth, gelb oder blau sei. Vorstellung und Vorgestelltes sind offenbar zwei ganz verschiedenen Welten angehörig, welche ebenso wenig eine Vergleichung unter einander zulassen als Farben und Töne, oder als die Buchstaben eines Buches mit dem Klang des Wortes, welches sie bezeichnen.

Wenn zwischen der Vorstellung in dem Kopfe eines Menschen *A* und dem vorgestellten Dinge irgend eine Art von Aehnlichkeit von Uebereinstimmung wäre, so würde eine zweite Intelligenz *B*, welche beide das Ding und seine Vorstellung im Kopfe von *A* sich nach den gleichen Gesetzen vorstellte, irgend eine Aehnlichkeit zwischen ihnen finden oder doch wenigstens denken können. Denn Gleiches in gleicher Weise abgebildet (vorgestellt) müsste doch gleiche Bilder (Vorstellungen) geben. Nun frage ich, welche Aehnlichkeit soll man sich denken zwischen dem Process im Gehirn, welcher die Vorstellung eines Tisches begleitet, und dem Tische selbst. Soll man sich die Gestalt des Tisches von elektrischen Strömen nachgezeichnet denken, und wenn der Vorstellende sich vorstellte, dass er um den Tisch herumgehe, soll dazu noch ein Mensch mittels elektrischer Ströme gezeichnet werden. Perspectivische Projectionen der Aussenwelt in den Gehirnhemisphären, wie sie wohl angenommen sind, genügen offenbar nicht, die Vorstellung von einem körperlichen Objecte darzustellen. Und gesetzten Fall eine kühne Phantasie schreckte vor einer solchen und ähnlichen Hypothesen nicht zurück, so wäre ein solches elektrisches Abbild des Tisches im Gehirn eben ein zweites körperliches Object, welches wahrgenommen werden müsste, aber keine Vorstellung vom Tische. Indessen sind es nicht gerade die Anhänger materialistischer Meinungen, welche der aufgestellten Behauptung zu widersprechen suchen werden, sondern die Anhänger spiritualistischer Meinungen. Und für diese sollte ich meinen, läge das Verhältniss im Gegentheil noch klarer da. Welche mögliche Aehnlichkeit soll denn die Vorstel-

lung, eine Veränderung in der unkörperlichen, räumlich nicht ausgedehnten Seele mit dem im Raume ausgedehnten Körper des Tisches haben können. Es ist von Seiten der spiritualistischen Philosophen, soviel ich weiss, nicht einmal jemals auch nur eine Hypothese oder eine Phantasie versucht worden, um das anzudeuten, und es liegt auch in der Natur dieser Ansicht, dass so etwas gar nicht versucht werden kann.

Was zunächst die Eigenschaften der Objecte der Aussenwelt betrifft, so zeigt eine leichte Überlegung, dass alle Eigenschaften, die wir ihnen zuschreiben können, nur Wirkungen bezeichnen, welche sie entweder auf unsere Sinne oder auf andere Naturobjecte ausüben. Farbe, Klang, Geschmack, Geruch, Temperatur, Glätte, Festigkeit gehören der ersteren Klasse an, sie bezeichnen Wirkungen auf unsere Sinnesorgane. Glätte und Festigkeit bezeichnen den Grad des Widerstands, den die berührten Körper entweder der gleitenden Berührung oder dem Drucke der Hand darbieten. Statt der Hand können aber auch andere Naturkörper eintreten, ebenso für die Prüfung anderer mechanischer Eigenschaften, der Elasticität und Schwere. Die chemischen Eigenschaften beziehen sich ebenfalls auf Reactionen d. h. Wirkungen, welche der betrachtete Naturkörper auf andere ausübt. Ebenso ist es mit den anderen physikalischen Eigenschaften der Körper, den optischen, elektrischen, magnetischen. Ueberall haben wir es mit Wechselbeziehungen verschiedener Körper auf einander zu thun, mit Wirkungen auf einander, welche von den Kräften abhängen, die verschiedene Körper auf einander ausüben. Denn alle Naturkräfte sind Kräfte, welche ein Körper auf den anderen ausübt. Wenn wir uns die blosse Materie ohne Kräfte denken, so ist sie auch ohne Eigenschaften, abgesehen von ihrer verschiedenen Vertheilung im Raume und ihrer Bewegung. Alle Eigenschaften der Naturkörper kommen deshalb auch erst zu Tage, wenn wir sie in die entsprechende Wechselwirkung mit anderen Naturkörpern oder mit unsern Sinnesorganen setzen. Da aber solche Wechselwirkung in jedem Augenblicke eintreten kann, beziehlich auch durch unseren Willen in einem beliebigen Augenblicke herbeigeführt werden kann, und wir dann immer die eigenthümliche Art der Wechselwirkung eintreten sehen, so schreiben wir den Objecten eine dauernde und stets zur Wirksamkeit bereite Fähigkeit zu solchen Wirkungen zu. Diese dauernde Fähigkeit nennen wir Eigenschaft.

Daraus geht nun hervor, dass in Wahrheit die Eigenschaften der Naturobjecte, trotz dieses Namens, gar nichts dem einzelnen Objecte an und für sich eigenes bezeichnen, sondern immer eine Beziehung zu einem zweiten Objecte (einschliesslich unserer Sinnesorgane) bezeichnen. Die Art der Wirkung muss natürlich immer von den Eigenthümlichkeiten sowohl des wirkenden Körpers abhängen, als von denen des Körpers, auf welchen gewirkt wird. Darüber sind wir auch keinen Augenblick in Zweifel, wenn wir von solchen Eigenschaften der Körper reden, welche sich zeigen, wenn der eine auf einen anderen ebenfalls der Aussenwelt angehörigen Körper wirkt, z. B. bei den chemischen Reactionen. Bei den Eigenschaften dagegen, welche auf Wechselbeziehungen der Dinge zu unsern Sinnesorganen beruhen, sind die Menschen von jeher geneigt gewesen, es zu vergessen, dass wir es auch hier mit der Reaction gegen ein besonderes Reagens, nämlich unsern Nervenapparat zu thun haben, und dass auch Farbe, Geruch und Geschmack, Gefühl der Wärme und Kälte Wirkungen sind, die ganz wesentlich von der Art des Organs, auf welches gewirkt wird, abhängen. Allerdings sind die Reactionen der Naturobjecte auf unsere Sinne die am häufigsten und am allgemeinsten wahrgenommenen, sie haben für unser Wohlsein und für unsere Behaglichkeit die überwiegendste Wichtigkeit; das Reagens, an welchem wir sie zu erproben haben, ist uns von Natur mitgegeben, aber dadurch wird das Verhältniss nicht anders.

Die Frage zu stellen, ob der Zinnober wirklich roth sei, wie wir ihn sehen, oder ob dies nur eine sinnliche Täuschung sei, ist deshalb sinnlos. Die Empfindung von Roth ist die normale Reaction normal gebildeter Augen für das von Zinnober reflectirte Licht. Ein Rothblinder wird den Zinnober schwarz oder dunkelgraugelb sehen; auch dies ist die richtige Reaction für sein besonders geartetes Auge. Er muss nur wissen, dass sein Auge eben anders geartet ist, als das anderer Menschen. An sich ist die eine Empfindung nicht richtiger und nicht falscher als die andere, wenn auch die Rothsehenden eine grosse Majorität für sich haben. Ueberhaupt existirt die rothe Farbe des Zinnobers nur, insofern es Augen giebt, die denen der Majorität der Menschen ähnlich beschaffen sind. Genau mit demselben Rechte ist es eine Eigenschaft des Zinnobers, schwarz zu sein, nämlich für die Rothblinden. Ueberhaupt ist das vom Zinnober zurückgeworfene Licht an sich durchaus nicht roth zu nennen, es ist nur für bestimmte Arten von Augen roth. Wenn wir von Eigenschaften der Körper sprechen, die sie in Bezug auf andere Körper der Aussenwelt haben, vergessen wir nicht in der Sprache auch den Körper zu bezeichnen, in Bezug auf welchen die Eigenschaft vorhanden ist. Wir sagen: „Blei ist löslich in Salpetersäure, es ist nicht löslich in Schwefelsäure". Wenn wir blos sagen wollten: „Blei ist löslich", so würden wir sogleich bemerken, dass dies eine unvollständige Behauptung ist, und würden sogleich fragen müssen, worin es löslich sei. Wenn wir aber sagen „Zinnober ist roth", so versteht es sich implicite von selbst, dass er für unsere Augen roth ist, und für die Augen anderer Menschen, welche wir als gleich beschaffen voraussetzen. Wir glauben das nicht erwähnen zu brauchen, und deshalb vergessen wir es auch wohl, und können verleitet werden zu glauben, die Röthe sei eine dem Zinnober, oder dem von ihm reflectirten Lichte ganz unabhängig von unseren Sinnesorganen zukommende Eigenschaft. Etwas anderes ist es, wenn wir behaupten, dass die Wellenlängen des vom Zinnober zurückgeworfenen Lichtes eine gewisse Länge haben. Das ist eine Aussage, die wir unabhängig von der besonderen Natur unseres Auges machen können, bei der es sich dann aber auch nur um Beziehungen zwischen der Substanz und den verschiedenen Aetherwellensystemen handelt.

Die einzige Beziehung, in welcher eine wirkliche Uebereinstimmung unserer Wahrnehmungen mit der Wirklichkeit stattfinden kann, ist die Zeitfolge der Ereignisse mit ihren verschiedenen Eigenthümlichkeiten. Die Gleichzeitigkeit, die Folge, die regelmässige Wiederkehr der Gleichzeitigkeit oder Folge kann in den Empfindungen ebenso stattfinden, wie in den Ereignissen. Die äusseren Ereignisse, wie ihre Wahrnehmungen, gehen in der Zeit vor sich, also können auch die Zeitverhältnisse der letzteren das getreue Abbild der Zeitverhältnisse der ersteren sein. Die Empfindung des Donners im Ohre folgt auf die Empfindung des Blitzes im Auge ebenso, wie die Schallerschütterung der Luft, welche durch die elektrische Entladung verursacht ist, später am Orte des Beobachters ankommt, als die Erschütterung des Lichtäthers. Doch ist hier allerdings zu bemerken, dass die Zeitfolge der Empfindungen insofern kein ganz getreues Abbild der Zeitfolge der äusseren Ereignisse ist, als die Leitung von den Sinnesorganen zum Gehirn Zeit, und zwar von verschiedenen Organen aus verschiedene Zeit kostet. Dazu kommt nun noch für Auge und Ohr die Zeit, welche Licht und Schall brauchen, um bis zum Organ zu gelangen. So sehen wir denn die Fixsterne jetzt, wie sie vor einer verschieden langen Reihe von Jahren waren.

Was die Abbildung der Raumverhältnisse betrifft, so geschieht eine solche allerdings an den peripherischen Nervenenden im Auge und an der tastenden Haut in einem gewissen Grade, aber doch nur in beschränkter Weise, da das Auge nur perspectivische Flächenabbildungen giebt, die Hand die objective Fläche an der ihr

möglichst congruent gestalteten Körperoberfläche abbildet. Ein directes Bild einer nach drei Dimensionen ausgedehnten Raumgrösse giebt weder das Auge noch die Hand. Erst durch die Vergleichung der Bilder beider Augen, oder durch Bewegung des Körpers, beziehlich der Hand, kommt die Vorstellung von Körpern zu Stande. Da nun unser Gehirn drei Dimensionen hat, so bleibt der Phantasie freilich ein weiter Spielraum, sich auszumalen, durch welchen Mechanismus etwa im Gehirn körperlich ausgedehnte Abbilder der äusseren körperlichen Gegenstände entstehen. Aber eine Nothwendigkeit oder auch nur eine Wahrscheinlichkeit für eine solche Annahme sehe ich nicht ein. Die Vorstellung eines räumlich ausgedehnten Körpers z. B. eines Tisches schliesst ein eine Masse von einzelnen Beobachtungen. Es liegt darin einbegriffen die ganze Reihe von Bildern, welche dieser Tisch mir gewähren würde, wenn ich ihn von verschiedenen Seiten und aus verschiedenen Entfernungen her betrachten würde, ferner die ganze Reihe von Tasteindrücken, welche ich erhalten würde, wenn ich meine Hände nach einander an die verschiedenen Stellen seiner Oberfläche legen würde. Eine solche Vorstellung von einem einzelnen individuellen Körper ist also in der That schon ein Begriff, welcher eine unendliche Anzahl von einzelnen in der Zeit auf einander folgenden Anschauungen unter sich begreift, die alle aus ihm abgeleitet werden können, ebenso wie der Gattungsbegriff „Tisch“ wiederum alle einzelnen Tische in sich begreift, und deren gemeinsame Eigenthümlichkeiten ausspricht. Die Vorstellung eines einzelnen individuellen Tisches, welche ich in mir trage, ist richtig und genau, wenn ich aus ihr richtig und genau herleiten kann, welche Empfindungen ich haben werde, wenn ich mein Auge und meine Hand in diese und jene bestimmte Stellung gegen den Tisch bringen werde. Welche andere Art der Aehnlichkeit zwischen einer solchen Vorstellung und dem dadurch vorgestellten Körper sein kann, weiss ich nicht zu begreifen. Jener ist das geistige Zeichen für diesen. Die Art dieses Zeichens ist nicht willkührlich von mir gewählt, sondern mir durch die Natur meiner Sinnesorgane und meines Geistes aufgedrungen. Dadurch unterscheidet sich diese Zeichensprache unserer Vorstellungen von den willkührlich gewählten Laut- und Buchstabenzeichen unserer Rede und Schrift. Eine Schrift ist richtig, wenn derjenige, welcher sie zu lesen weiss, richtige Vorstellungen danach bildet, und die Vorstellung von einem Dinge ist richtig für denjenigen, welcher danach richtig vorauszubestimmen weiss, welche sinnlichen Eindrücke er von dem Dinge erhalten wird, wenn er sich in bestimmte äussere Beziehungen zu ihm setzt. Uebrigens ist es ganz gleichgültig, welcher Art diese geistigen Zeichen sind, wenn sie nur ein hinreichend mannigfaltiges und geordnetes System bilden; ebenso wie es gleichgültig ist, wie die Worte einer Sprache lauten, wenn nur eine hinreichende Anzahl vorhanden ist und hinreichende Mittel ihre grammatikalischen Beziehungen zu einander zu bezeichnen.

Man muss sich bei dieser Ansicht von der Sache nur nicht die Behauptung unterschieben lassen, dass hiernach alle unsere Vorstellungen von den Dingen falsch seien, weil sie den Dingen nicht gleich sind, und dass wir demnach von dem wahren Wesen der Dinge nichts wissen könnten. Dass sie den Dingen nicht gleich sein können, liegt in der Natur des Wissens. Die Vorstellungen sollen doch nur Abbilder der Dinge sein, und jedes Bild ist das Bild eines Dinges nur für denjenigen, der es zu lesen weiss, der sich mit Hülfe des Bildes eine Vorstellung vom Dinge machen kann. Jedes Bild ist seinem Gegenstande in einer Beziehung ähnlich, in allen andern unähnlich, sei es nun ein Gemälde, eine Statue, die musikalische oder dramatische Darstellung einer Gemüthsstimmung u. s. w. So sind die Vorstellungen von der Aussenwelt Bilder der gesetzmässigen Zeitfolge der Naturereignisse, und wenn sie nach den Gesetzen unseres Denkens richtig gebildet

sind, und wir sie durch unsere Handlungen richtig in die Wirklichkeit wieder zurückzuübersetzen vermögen, sind die Vorstellungen, welche wir haben, auch für unser Denkvermögen die einzig wahren; alle andere würden falsch sein.

Ich meine, es ist deshalb auch ein Missverständniss, nach einer prästabilirten Harmonie zwischen den Gesetzen den Denkens und denen der Natur suchen zu wollen, nach einer Identität zwischen Natur und Geist, oder wie man es sonst nennen will. Es kann ein Zeichensystem mehr oder weniger vollständig und zweckmässig sein; danach wird es leichter oder weniger leicht anzuwenden, genauer in der Bezeichnung oder ungenauer sein, wie wir dies an den verschiedenen Sprachen sehen, aber übrigens wird sich jedes mehr oder weniger gut der Sache anbequemen lassen. Wenn es keine Anzahl ähnlicher Naturobjecte in der Welt gäbe, würde uns unsere Fähigkeit, Gattungsbegriffe zu bilden, freilich nichts helfen; wenn es keine festen Körper gäbe, würden unsere geometrischen Fähigkeiten unentwickelt und ungebraucht bleiben müssen, ebenso wie das körperliche Auge uns nicht helfen würde in einer Welt, wo kein Licht existirte. Wenn man in diesem Sinne von einer Anpassung unserer Denkgesetze an die Gesetze der Natur reden will, können wir es gelten lassen; offenbar braucht eine solche Anpassung aber weder vollständig noch genau zu sein. Das Auge ist ein praktisch äusserst brauchbares Organ, obgleich es weder in allen Entfernungen deutlich sehen, noch Aethervibrationen aller Art wahrnehmen, noch die Strahlen, welche von einem Punkte ausgehen, genau in einen Punkt vereinigen kann. Unsere Verstandesthätigkeiten sind an die Thätigkeit eines körperlichen Organs, des Gehirns, gebunden, wie das Sehvermögen an das Auge. Der menschliche Verstand bezwingt wunderbar viel in der Welt, und bringt es unter ein strenges causales Gesetz; ob er nothwendig alles müsse bezwingen können, was in der Welt bestehen und geschehen könne, dafür scheint mir keine Garantie zu existiren.

Wir haben nun noch zu reden von der Art, wie unsere Vorstellungen und Wahrnehmungen durch inductive Schlüsse gebildet werden. Das Wesen unserer Schlüsse finde ich am besten auseinandergesetzt in der Logik von Stuart Mill. Sobald der Vordersatz des Schlusses nicht ein Gebot ist, welches durch fremde Autorität für unser Handeln oder Glauben aufgestellt ist, sondern ein Satz, der sich auf die Wirklichkeit bezieht, und also nur das Resultat der Erfahrung sein kann, so lehrt uns der Schluss in der That nichts neues, was wir nicht schon gewusst haben, ehe wir ihn machten. Also z. B.

Major: Alle Menschen sind sterblich.
Minor: Cajus ist ein Mensch.
Conclusio: Cajus ist sterblich.

Den Major, dass alle Menschen sterblich sind, welches ein Erfahrungssatz ist, dürfen wir eigentlich nicht aufstellen, ehe wir nicht wissen, ob die Conclusio richtig ist, dass auch Cajus, der ein Mensch ist, gestorben sei, oder sterben werde. Wir müssen also des Schlusssatzes sicher sein, ehe wir noch den Major, durch welchen wir ihn beweisen wollen, aufstellen können. Das scheint also ein Herumgehen im Cirkel zu sein. Das wahre Verhältniss ist offenbar das: Wir und andere Menschen haben bisher ausnahmslos beobachtet, dass kein Mensch über ein gewisses Alter hinaus gelebt hat. Die Beobachtenden haben diese Erfahrungen, dass Lucius, Flavius, und wie die einzelnen Menschen sonst hiessen, von denen sie es wissen, gestorben sind, in den allgemeinen Satz zusammengefasst, dass alle Menschen sterben, und haben sich berechtigt gefühlt, weil dieses Ende in allen den Fällen regelmässig eintrat, welche beobachtet worden sind, diesen allgemeinen Satz auch für gültig zu erklären für alle diejenigen Fälle, welche noch später zur Beobachtung kommen würden, und so bewahren wir uns den Schatz von Erfahrungen, den

wir oder andere Beobachter in diesem Punkte bisher gemacht haben, in Form des allgemeinen Satzes im Gedächtnisse auf, der den Major des obigen Schlusses bildet.

Es ist aber klar, dass wir zu der Ueberzeugung, Cajus werde sterben, auch unmittelbar, ohne in unserem Bewusstsein den allgemeinen Satz zu bilden, hätten kommen können, indem wir seinen Fall mit allen uns bekannten früheren verglichen hätten, und das ist sogar die gewöhnlichere und ursprünglichere Art, durch Induction zu schliessen. Dass dergleichen Schlüsse ohne bewusste Reflexion entstehen, indem in unserem Gedächtnisse das Gleichartige der früher beobachteten Fälle sich an einander fügt und sich gegenseitig verstärkt, zeigt sich namentlich in denjenigen Fällen von inductivem Schliessen, wo es uns nicht gelingt, eine ausnahmlos geltende Regel mit genau bestimmten Grenzen ihrer Gültigkeit aus den bisherigen Erfahrungen zu abstrahiren, wie das der Fall ist bei allen verwickelten Vorgängen. So können wir z. B. aus der Analogie früherer ähnlicher Fälle zuweilen mit ziemlicher Sicherheit voraussagen, was einer unserer Bekannten thun wird, wenn er unter gewissen Umständen sich zum Handeln entscheiden wird, weil wir seinen Charakter kennen, z. B. als ehrgeizig oder als feig, ohne dass wir doch genau anzugeben wissen, wonach wir den Grad des Ehrgeizes oder der Feigheit zu messen haben, und warum der vorhandene Grad von Ehrgeiz oder Feigheit ausreichen wird, das Handeln des Menschen so zu bestimmen, wie es unserer Erwartung nach ausfallen soll.

Bei den eigentlich sogenannten und mit Bewusstsein vollzogenen Schlüssen, wenn sie sich nicht auf Gebote, sondern auf Erfahrungssätze stützen, thun wir also in der That nichts anderes, als dass wir mit Ueberlegung und sorgfältiger Prüfung diejenigen Schritte der inductiven Verallgemeinerung unserer Erfahrungen wiederholen, welche schon vorher in schnellerer Weise ohne bewusste Reflexion ausgeführt waren, entweder von uns selbst, oder von anderen Beobachtern, denen wir vertrauen. Wenn aber auch durch die Formulirung eines allgemeinen Satzes aus unseren bisherigen Erfahrungen nichts wesentlich Neues unserem bisherigen Wissen hinzugefügt wird, so ist dieselbe doch in vieler Beziehung nützlich. Einen bestimmt ausgesprochenen allgemeinen Satz können wir viel leichter im Gedächtnisse aufbewahren und andern Menschen mittheilen, als wenn dies mit allen einzelnen Fällen geschehen müsste. Wir werden durch seine Aufstellung veranlasst, jeden neu eintretenden Fall gerade in Bezug auf die Richtigkeit jener Verallgemeinerung genau zu prüfen, wobei jede Ausnahme uns doppelt stark auffallen wird; wir werden uns eher an die Beschränkungen der Gültigkeit erinnern, wenn wir den Satz in allgemeiner Form vor uns haben, als wenn wir alle einzelnen Fälle durchlaufen müssen. Es wird also durch eine solche bewusste Formulirung des Inductionsschlusses mancherlei gewonnen für die Bequemlichkeit und Sicherheit des Verfahrens, aber es wird im Wesentlichen nichts Neues hinzugefügt, was nicht schon in den ohne Reflexion ausgeführten Analogieschlüssen bestände, mittels deren wir z. B. den Charakter eines Menschen aus seinen Gesichtszügen und seinen Bewegungen beurtheilen, oder nach der Kenntniss seines Charakters voraussagen, was er in einem gegebenen Falle thun wird.

Wir haben nun genau denselben Fall bei unseren Sinneswahrnehmungen. Wenn wir Erregung in denjenigen Nervenapparaten gefühlt haben, deren peripherische Enden an der rechten Seite beider Netzhäute liegen, so haben wir in millionenfach wiederholten Erfahrungen unseres ganzen Lebens gefunden, dass ein leuchtender Gegenstand nach unserer linken Seite hin vor uns lag. Wir mussten die Hand nach links hin erheben, um das Licht zu verdecken, oder das leuchtende Object zu ergreifen, oder uns nach links hin bewegen, um uns ihm zu nähern. Wenn also in diesen Fällen kein eigentlicher bewusster Schluss vorliegt, so ist doch die

wesentliche und ursprüngliche Arbeit eines solchen vollzogen, und das Resultat desselben erreicht, aber freilich nur durch die unbewussten Vorgänge der Association von Vorstellungen, die im dunklen Hintergrunde unseres Gedächtnisses vor sich geht, und deren Resultate sich daher auch unserem Bewusstsein aufdrängen, als gewonnen durch eine uns zwingende, gleichsam äussere Macht, über die unser Wille keine Gewalt hat.

Es fehlt an diesen Inductionsschlüssen, die zur Bildung unserer Sinneswahrnehmungen führen, allerdings die reinigende und prüfende Arbeit des bewussten Denkens; dessen ungeachtet glaube ich sie doch ihrem eigentlichen Wesen nach als Schlüsse, unbewusst vollführte Inductionsschlüsse, bezeichnen zu dürfen.

Ihrer Aufnahme in das bewusste Denken und ihrer Formulirung in der Normalform logischer Schlüsse widersteht nun noch ein ihnen ganz eigenthümlicher Umstand, nämlich der, dass wir gar nicht näher bezeichnen können, was in uns vorgegangen ist, wenn wir eine Empfindung in einer bestimmten Nervenfaser hatten, und wodurch diese zu unterscheiden ist von entsprechenden Empfindungen in anderen Nervenfasern. Haben wir z. B. eine Lichtempfindung in gewissen Fasern des Sehnervenapparats gehabt, so wissen wir nur, dass wir eben eine Empfindung eigenthümlicher Art gehabt haben, die sich von allen anderen Sinnesempfindungen und auch von allen anderen Gesichtsempfindungen unterschieden hat, und bei welcher wir immer ein lichtes Object nach links hin fanden. Wir können im natürlichen Zustande, und ehe wir Physiologie studirt haben, von der Empfindung nicht anders sprechen, und die Empfindung selbst für unser eigenes Vorstellen nicht begrenzen und nicht festhalten, als indem wir sie bezeichnen durch die Bedingungen, unter denen sie zu Stande gekommen ist. Ich muss sagen: „ich sehe etwas Helles nach links hin“; das ist der einzige Ausdruck, den ich der Empfindung geben kann. Dass wir Nerven haben, dass diese Nerven erregt worden sind, und zwar Nerven, die rechts in den Netzhäuten endigen, lernen wir erst spät durch wissenschaftliches Studium, und dadurch bekommen wir erst die Mittel, diese Art der Empfindung zu definiren unabhängig von der Art, wie sie gewöhnlich hervorgerufen wird.

Aehnlich verhält es sich bei den meisten Sinnesempfindungen. Die Geschmacks- und Geruchsempfindungen wissen wir meistentheils selbst ihrer Qualität nach nicht anders zu bezeichnen, als durch die Benennung derjenigen Körper, welche geschmeckt oder gerochen werden, einige wenige, ziemlich unbestimmte, allgemeinere Bezeichnungen abgerechnet, wie „süss“, „sauer“, „bitter“, „scharf“.

Diese Urtheile, durch welche wir von unseren Sinnesempfindungen auf die Existenz einer äusseren Ursache derselben hinübergehen, können wir also auf dem gewöhnlichen Zustande unseres Bewusstseins gar nicht einmal in die Form bewusster Urtheile erheben. Das Urtheil, dass links von mir ein helles Object sei, weil die rechts in meiner Netzhaut endenden Nervenfasern sich in Erregungszustand befinden, kann Jemand, der von der inneren Beschaffenheit des Auges nichts weiss, nur so aussprechen: „Links ist etwas Helles, weil ich es dort sehe“. Und demgemäss kann auch die Erfahrung, dass, wenn ich das Auge rechts drücke, die dort endenden Nervenfasern erregt werden, vom Standpunkte der täglichen Erfahrung gar nicht anders ausgesprochen werden, als so: „Wenn ich das Auge rechts drücke, sehe ich links einen hellen Schein“. Es fehlt jedes Mittel, die Empfindung anders zu beschreiben und mit andern früher gehabten Empfindungen zu identificiren, als dadurch, dass man den Ort des scheinbar entsprechenden äusseren Objects bezeichnet. Deshalb haben also diese Fälle der Erfahrung das Eigenthümliche, dass man die Beziehung der Empfindung auf ein äusseres Object gar nicht einmal aussprechen kann, ohne sie schon in der Bezeichnung der Empfindung vorauszuschicken, und ohne das schon vorauszusetzen, von dem man erst noch reden will.

Dass wir nun, nachdem wir den physiologischen Ursprung und Zusammenhang der Sinnestäuschungen kennen gelernt haben, doch die Täuschung trotz unserer besseren Einsicht nicht los werden können, rührt eben davon her, dass die Induction durch eine unbewusste und unwillkührliche Thätigkeit des Gedächtnisses gebildet ist, die eben deshalb unserm Bewusstsein als eine fremde, zwingende Naturkraft erscheint. Uebrigens finden wir dafür vielfältige Analogien bei allen möglichen anderen Arten des Scheines. Ich möchte sagen, dass aller Schein entsteht durch vorschnelle unreflectirte Inductionen, bei denen wir aus früheren Fällen Schlüsse auf neue Fälle ziehen, und wo die Neigung zu den falschen Schlüssen bestehen bleibt, trotz der auf bewusste Ueberlegung gegründeten bessern Einsicht in die Sache. Die Sonne geht jeden Abend vor unseren Augen hinter dem feststehenden Horizonte scheinbar unter, obgleich wir sehr wohl wissen, dass jene feststeht und dieser sich bewegt. Ein Schauspieler, der einen alten Mann geschickt darstellt, ist auf der Bühne für uns auch ein alter Mann, so lange wir dem unmittelbaren Eindrucke freien Lauf lassen, und uns nicht gewaltsam besinnen, dass wir vom Theaterzettel her wissen, dieses sei der uns bekannte junge Schauspieler, welcher dort herumagirt. Wir halten ihn für zornig oder für leidend, je nachdem er uns die eine oder andere Art der Mienen und Geberden zeigt; er erregt Schrecken oder Mitleiden in uns, wir zittern vor dem Augenblicke, den wir kommen sehen, wo er etwas Furchtbares ausführen oder erdulden wird, und die begründete Ueberzeugung, dass dies alles nur Schein und Spiel sei, hilft durchaus nichts gegen unsere Gemüthsbewegungen, so lange der Schauspieler nicht aus seiner Rolle fällt. Im Gegentheil ergreift und foltert uns eine solche lügenhafte Geschichte, der wir scheinbar persönlich beiwohnen, viel mehr, als es eine entsprechende wahre thun würde, von der wir einen trockenen actenmässigen Bericht lesen.

Nun sind unsere Erfahrungen darüber, dass gewisse Mienen, Geberden und Sprechweisen den Zustand heftigen Zorns verrathen, überhaupt die Erfahrungen über die äusseren Zeichen gewisser Gemüthszustände und Charaktereigenthümlichkeiten, welche der Schauspieler uns vorführen kann, doch lange nicht so zahlreich und regelmässig wiederholt, wie diejenigen Erfahrungen, welche uns gelehrt haben, dass gewisse Sinnesempfindungen gewissen äusseren Objecten entsprechen. Daher dürfen wir uns nicht wundern, wenn die Vorstellung des zu einer Sinnesempfindung gewöhnlich gehörigen Objects nicht schwindet, auch wenn wir wissen, dass in dem vorliegenden einzelnen Falle ein solches Object nicht vorhanden sei.

Von der grössten Wichtigkeit endlich für die Festigkeit unserer Ueberzeugung von der Richtigkeit unserer sinnlichen Wahrnehmung sind die Prüfungen, welche wir mittels der willkührlichen Bewegungen unseres Körpers anstellen. Es entsteht dadurch den blos passiven Beobachtungen gegenüber dieselbe Art festerer Ueberzeugung, welche wir bei wissenschaftlichen Untersuchungen durch das experimentirende Verfahren gewinnen. Der eigentliche letzte Grund, durch welchen alle unsere bewusst vollzogenen Inductionen überzeugende Kraft erhalten, ist das Causalgesetz. Wenn wir sehr häufig zwei Naturerscheinungen verbunden haben auftreten sehen, z. B. den Donner immer dem Blitze folgen, so erscheinen sie gesetzmässig aneinander gebunden, und wir schliessen, dass ein gemeinsamer Grund für beide bestehen muss, und wenn dieser Causalnexus bisher immer bewirkt hatte, dass Donner und Blitz sich begleiteten, so werden gleiche Ursachen auch in Zukunft gleiche Wirkungen hervorbringen müssen, und der Erfolg wird auch in Zukunft derselbe sein müssen. So lange wir nun aber auf blosse Beobachtung solcher Phänomene beschränkt sind, welche ohne unser Zuthun von selbst eintreten, ohne Experimente anstellen zu können, bei denen wir den Complex der Ursachen verändern, gewinnen wir schwer die Überzeugung, dass wir alle Bedingungen, welche auf den Erfolg

Einfluss haben können, wirklich schon ermittelt haben. Es muss schon eine ungeheuere Mannigfaltigkeit von Fällen existiren, auf welche das Gesetz passt, und es muss das Gesetz den Erfolg mit grosser Genauigkeit bestimmen, wenn wir uns in einem Falle blosser Beobachtung beruhigen sollen. So ist es bei den Bewegungen des Planetensystems. Wir können freilich mit den Planeten nicht experimentiren, aber die von NEWTON aufgestellte Theorie der allgemeinen Gravitation giebt so vollständige und genaue Erklärung der verhältnissmässig verwickelten scheinbaren Bewegungen dieser Körper am Himmelsgewölbe, dass wir nicht mehr anstehen, sie als ausreichend bewiesen zu betrachten. Und doch sind die Versuche von REICH über die Massenanziehung von Bleikugeln, die von FOUCAULT über die Ablenkung des schwingenden Pendels durch die Rotation der Erde, von dem letzteren und FIZEAU über die Messung der Lichtgeschwindigkeit innerhalb irdischer Distanzen von dem grössten Werth, um unsere Ueberzeugung auch auf experimentellem Wege zu kräftigen.

Es giebt vielleicht kein Ergebniss blosser Beobachtung, welches sich so ausschliesslich richtig erwiesen hat, als der vorher als Beispiel gebrauchte allgemeine Satz, dass alle Menschen, ehe sie ein gewisses Alter überschritten haben, sterben. Es ist unter vielen Millionen von Menschen kein Ausnahmsfall vorgekommen. Wäre einer vorgekommen, so würden wir annehmen dürfen, dass wir Nachricht davon hätten. Unter den Verstorbenen befinden sich Individuen, die in den verschiedensten Klimaten, von den verschiedensten Nahrungsmitteln gelebt und die verschiedensten Beschäftigungen gehabt haben. Dessen ungeachtet kann man nicht sagen, dass die Behauptung, alle Menschen müssten sterben, denselben Grad von Sicherheit habe, wie irgend ein Satz aus der Physik, dessen Consequenzen mit der Erfahrung in vielfachen Modificationen genau experimentell verglichen sind. Für das Sterben der Menschen kenne ich den Causalnexus nicht. Ich weiss nicht die Ursachen anzugeben, welche die Alterschwäche unabweichlich herbeiführen, wenn keine gröbere äussere Schädlichkeit dem Leben früher ein Ende gemacht hat. Ich habe mich nicht durch Experimente überzeugen können, dass, wenn ich jene Ursachen wirken lasse, Altersschwäche unausbleiblich eintritt, und dass sie nicht eintritt, wenn ich jene Ursachen ihres Eintritts beseitige. Ich kann Jemandem, der gegen mich behauptet, dass unter Anwendung gewisser Mittel das Leben des Menschen unbestimmt lange erhalten bleiben würde, zwar den äussersten Grad der Ungläubigkeit entgegensetzen, aber keinen absoluten Widerspruch, wenn ich nicht weiss, dass wirklich Individuen unter den von ihm bezeichneten Umständen gelebt haben und schliesslich doch gestorben sind. Wenn ich dagegen behaupte, dass alles flüssige Quecksilber, wenn es ungehindert ist, durch Wärme sich ausdehnt, so weiss ich, dass höhere Temperatur und Ausdehnung des Quecksilbers, so oft ich sie zusammen beobachtet habe, nicht blos auf der Wirkung einer unbekannten gemeinsamen dritten Ursache beruht haben, wie ich im Falle blosser Beobachtungen glauben könnte, sondern ich weiss durch den Versuch, dass die Wärme für sich hinreichte, auch die Ausdehnung hervorzubringen. Ich habe Quecksilber öfters erwärmt, zu verschiedenen Zeiten. Ich habe mir dabei nach eigenem Willen die Augenblicke gewählt, wo ich den Versuch beginnen wollte. Wenn also dabei das Quecksilber sich ausdehnte, so musste die Ausdehnung bedingt sein durch diejenigen Umstände, welche ich durch meinen Versuch herbeigeführt hatte. Ich weiss dadurch, dass die Erwärmung an sich ausreichender Grund für die Ausdehnung war, und dass keine anderen verborgenen Einflüsse weiter nöthig waren, um sie hervorzubringen. Durch verhältnissmässig wenige, gut angestellte Versuche bin ich im Stande, die ursächlichen Bedingungen eines Ereignisses mit grösserer Sicherheit festzustellen, als durch millionenfache Beobachtung, bei welcher ich die Bedingungen

nicht habe beliebig verändern können. Wenn ich z. B. die Ausdehnung des Quecksilbers nur gesehen hätte an einem mir unzugänglichen Thermometer in einem Orte, dessen Luft bei jeder Temperatur mit Feuchtigkeit gesättigt blieb, so hätte ich fragen müssen, dehnt sich das Quecksilber durch die Wärme aus, oder durch die Feuchtigkeit. Erst der Versuch, ob bei gleichbleibender Wärme Veränderung der Feuchtigkeit, ob bei gleichbleibender Feuchtigkeit Veränderung der Wärme das Volumen des Quecksilbers verändere, konnte Aufschluss geben.

Dieselbe grosse Bedeutung nun, welche das Experiment für die Sicherheit unserer wissenschaftlichen Ueberzeugungen hat, hat es auch für die unbewussten Inductionen unserer sinnlichen Wahrnehmungen. Erst indem wir unsere Sinnesorgane nach eigenem Willen in verschiedene Beziehungen zu den Objecten bringen, lernen wir sicher urtheilen über die Ursachen unserer Sinnesempfindungen, und solches Experimentiren geschieht von frühester Jugend an ohne Unterbrechung das ganze Leben hindurch.

Wenn die Gegenstände nur an unseren Augen vorbeigeführt würden durch fremde Kraft, ohne dass wir selbst etwas dazu thun könnten, würden wir uns in einer solchen optischen Phantasmagorie vielleicht nie zurecht gefunden haben, ebenso wenig als das Menschengeschlecht sich die scheinbaren Bewegungen der Planeten am Himmelsgewölbe zu deuten wusste, ehe man die Gesetze des perspectivischen Sehens wissenschaftlich auf sie anwenden konnte. Wenn wir aber bemerken, dass wir von einem vor uns stehenden Tische verschiedene Bilder erhalten können, wenn wir nur den Platz wechseln, dass wir nach unserem Willen in jedem uns beliebigen Augenblicke bald die erste Ansicht desselben, bald die zweite haben können, dadurch, dass wir unsere Stellung passend wechseln, dass der Tisch unseren Sinnen entschwinden kann, aber in jedem uns beliebigen Augenblicke wieder da ist, wenn wir die Augen nach ihm hinwenden, so entsteht in uns die experimentell begründete Ueberzeugung, dass unsere Bewegungen der Grund der wechselnden Ansichten des Tisches sind, dass dieser, ob wir ihn nun gerade sehen oder nicht sehen, doch von uns, sobald wir nur wollen, gesehen werden kann. So lernen wir durch unsere Bewegungen das ruhende Raumgebild des Tisches kennen als den Grund wechselnder Bilder in unseren Augen. Wir erklären den Tisch als daseiend, unabhängig von unserer Beobachtung, weil wir ihn in *jedem uns beliebigen Augenblicke* beobachten können, sobald wir uns in passende Stellung zu ihm versetzen.

Das Wesentliche bei diesem Verfahren ist eben das Princip des Experimentirens. Wir verändern einen Theil der Bedingungen, unter denen das Object wahrgenommen wird, aus eigenem Antrieb und eigener Machtvollkommenheit. Wir wissen, dass die hierdurch veranlassten Veränderungen in der Art, wie die Objecte uns erscheinen, keinen andern Grund haben, als die Bewegungen, welche wir gemacht haben. Wir gewinnen so eine verschiedene Reihe von Anschauungen desselben Objects, von denen wir uns mit experimenteller Sicherheit überzeugen können, dass sie doch nur Anschauungen des einen unverändert gebliebenen Objects, ihrer gemeinsamen Ursache, sind. In der That sehen wir auch die Kinder in dieser Weise an den Gegenständen experimentiren. Sie drehen sie immer wiederholt nach allen Seiten, betasten sie mit den Händen und dem Munde, wiederholen dies Tag für Tag mit denselben Gegenständen, und prägen sich so ihre Form ein, d. h. die verschiedenen Gesichts- und Tasteindrücke, welche derselbe Gegenstand, von verschiedenen Seiten betrachtet und befühlt, gewährt.

Bei solchem Experimentiren an den Objecten zeigt sich ein Theil der Veränderungen in den Sinneseindrücken abhängig von dem eigenen Willen, ein anderer, nämlich alles, was von der Beschaffenheit der gerade vorliegenden Objecte abhängt, drängt sich uns auf mit einer Nothwendigkeit, die wir nicht willkührlich verändern

können, und die uns am fühlbarsten wird, wenn sie unangenehme Empfindungen, Schmerz, erregt. So kommen wir zur Anerkennung einer von unserem Wollen und Vorstellen unabhängigen, also äusserlichen Ursache unserer Empfindungen. Diese erweist sich dabei als fortbestehend unabhängig von unserer augenblicklichen Wahrnehmung, da wir eine jede aus der Reihe von Empfindungen, die sie in uns hervorbringen kann, in jedem von uns gewählten Augenblicke durch passende Manipulationen und Bewegungen wieder eintreten lassen können. So wird die äussere Ursache als ein unabhängig von unserer Wahrnehmung bestehendes Object anerkannt.

Es schiebt sich hier der Begriff der Ursache hinein, und es ist zu fragen, ob es zulässig ist, diesen bei der ursprünglichen sinnlichen Wahrnehmung vorauszusetzen. Wir sind hier wieder in der Verlegenheit, dass wir die Vorgänge nur in der Sprache der reflectirenden Wissenschaft beschreiben können, während in der ursprünglichen Form der bewussten Wahrnehmung die Reflexion des Bewusstseins auf sich selber noch nicht deutlich enthalten ist.

Das natürliche Bewusstsein, welches ganz im Interesse der Beobachtung der Aussenwelt aufgeht, und wenig Veranlassung hat, seine Aufmerksamkeit dem neben dem bunten Wechsel der äusseren Objecte immer unverändert erscheinenden Ich zuzuwenden, pflegt nicht zu beachten, dass die Eigenschaften der betrachteten und betasteten Objecte Wirkungen derselben theils auf andere Naturkörper, hauptsächlich aber auf unsere Sinne sind. Indem nun so ganz abgesehen wird von unserem Nervensystem und unserem Empfindungsvermögen, als dem gleichbleibenden Reagens, auf welches die Wirkung ausgeübt wird, und die Verschiedenheit der Wirkung nur als Verschiedenheit des Objects, von dem sie ausgeht, beachtet wird, kann die Wirkung auch nicht mehr als Wirkung anerkannt werden (denn jede Wirkung muss Wirkung auf etwas Anderes sein), sondern sie wird als Eigenschaft des Körpers objectiv hingestellt, und nur als ihm angehörig betrachtet, und wenn man sich dann einmal darauf besinnt, dass wir diese Eigenschaften wahrnehmen, so erscheint uns consequenter Weise unser Eindruck als ein reines Bild der äusseren Beschaffenheit, der nur jenes Aeussere wiedergiebt und nur von ihm abhängig ist.

Besinnen wir uns aber über den Grund dieses Verfahrens, so ist es klar, dass wir aus der Welt unserer Empfindungen zu der Vorstellung von einer Ausenwelt niemals kommen können, als durch einen Schluss von der wechselnden Empfindung auf äussere Objecte als die Ursachen dieses Wechsels; wenn wir auch, nachdem die Vorstellung der äusseren Objecte einmal gebildet ist, nicht mehr beachten, wie wir zu dieser Vorstellung gekommen sind, besonders darum, weil der Schluss so selbstverständlich erscheint, dass wir uns seiner als eines neuen Resultats gar nicht bewusst werden.

Demgemäss müssen wir das Gesetz der Causalität, vermöge dessen wir von der Wirkung auf die Ursache schliessen, auch als ein aller Erfahrung vorausgehendes Gesetz unseres Denkens anerkennen. Wir können überhaupt zu keiner Erfahrung von Naturobjecten kommen, ohne das Gesetz der Causalität schon in uns wirkend zu haben, es kann also auch nicht erst aus den Erfahrungen, die wir an Naturobjecten gemacht haben, abgeleitet sein.

Das letztere ist vielfältig behauptet worden; das Causalgesetz sollte ein durch Induction gewonnenes Naturgesetz sein. Auch Stuart Mill hat es in neuerer Zeit noch wieder so aufgefasst, und sogar die Möglichkeit besprochen, dass es vielleicht in andern Fixsternsystemen nicht gültig sein könnte. Dem gegenüber will ich hier nur zu bedenken geben, dass es mit dem empirischen Beweise des Gesetzes vom zureichenden Grunde äusserst misslich aussieht. Denn die Zahl der Fälle, wo wir den causalen Zusammenhang von Naturprocessen vollständig glauben

nachweisen zu können, ist verhältnissmässig gering gegen die Zahl derjenigen, wo wir dazu noch durchaus nicht im Stande sind. Jene ersteren gehören fast ausschliesslich der unorganischen Natur an, zu den unverstandenen Fällen gehört die Mehrzahl der Erscheinungen in der organischen Natur. Ja in den Thieren und im Menschen nehmen wir nach den Aussagen unseres eigenen Bewusstseins sogar mit Bestimmtheit ein Princip des freien Willens an, für welches wir ganz entschieden Unabhängigkeit von der Strenge des Causalgesetzes in Anspruch nehmen, und trotz aller theoretischen Speculationen über die möglichen Irrthümer bei dieser Ueberzeugung, wird sie unser natürliches Bewusstsein, glaube ich, kaum jemals los werden. Also gerade den uns am besten und genauesten bekannten Fall des Handelns betrachten wir als eine Ausnahme von jenem Gesetze. Wäre also das Causalgesetz ein Erfahrungsgesetz, so sähe es mit seinem inductiven Beweise sehr misslich aus. Den Grad seiner Gültigkeit würden wir höchstens mit denjenigen der meteorologischen Regeln, dem Drehungsgesetz des Windes u. a. m. vergleichen können. Wir würden den vitalistischen Physiologen durchaus nicht mit Entschiedenheit widersprechen dürfen, wenn sie das Causalgesetz für gut in der unorganischen Natur erklären, für die organische aber ihm nur Wirksamkeit in einer niederen Sphäre zuschreiben.

Endlich trägt das Causalgesetz den Charakter eines rein logischen Gesetzes auch wesentlich darin an sich, dass die aus ihm gezogenen Folgerungen nicht die wirkliche Erfahrung betreffen, sondern deren Verständniss, und dass es deshalb durch keine mögliche Erfahrung je widerlegt werden kann [1]. Denn wenn wir irgend wo in der Anwendung des Causalgesetzes scheitern, so schliessen wir daraus nicht, dass es falsch sei, sondern nur, dass wir den Complex der bei der betreffenden Erscheinung mitwirkenden Ursachen noch nicht vollständig kennen. Und wenn wir endlich mit dem Verständniss gewisser Naturprocesse nach dem Causalgesetze fertig geworden sind, so sind die Folgerungen aus demselben: dass gewisse materielle Massen im Raume existiren und sich bewegen, und mit gewissen Bewegungskräften auf einander wirken. Aber sowohl der Begriff der Materie, wie der der Kraft sind ganz abstracter Art, wie sich schon aus ihren Attributen leicht ergiebt. Materie ohne Kraft soll nur im Raume dasein, aber nicht wirken, also auch keine Eigenschaften haben. Sie würde also ganz gleichgültig sein für alle anderen Vorgänge in der Welt, sowie für unsere Wahrnehmungen, sie würde so gut wie nicht existirend sein. Kraft ohne Materie nun gar, soll wirken, aber nicht unabhängig dasein können, denn das Daseiende ist alles Materie. Beide Begriffe können also nie von einander getrennt werden, sie sind nur abstracte Betrachtungsweisen derselben Naturobjecte nach verschiedenen Beziehungen. Eben deshalb können aber weder Materien noch Kräfte directer Gegenstand der Beobachtung sein, sondern immer nur die erschlossenen Ursachen der Erfahrungsthatsachen. Wenn wir also schliesslich als letzte und zureichende Gründe der Naturerscheinungen Abstracta hinstellen, welche nie Gegenstand der Erfahrung sein können, wie können wir sagen, dass die Erscheinungen zureichende Gründe haben, sei durch die Erfahrung bewiesen?

Das Gesetz vom zureichenden Grunde ist vielmehr nichts anderes als die Forderung, alles begreifen zu wollen. Das Verfahren unseres Begreifens den Naturerscheinungen gegenüber ist, dass wir G a t t u n g s b e g r i f f e und N a t u r g e s e t z e zu finden suchen. Naturgesetze sind nichts als Gattungsbegriffe für die Veränderungen in der Natur. Indem wir aber die Naturgesetze als gültig und wirksam betrachten müssen unabhängig von unserem Beobachten und Denken, während sie

[1] Helmholtz. Ueber das Sehen des Menschen; ein populär wissenschaftlicher Vortrag; Leipzig, 1855.

als Gattungsbegriffe zunächst nur die Ordnung unseres Denkens betreffen würden, nennen wir sie Ursachen und Kräfte. Wenn wir also Naturerscheinungen nicht auf ein Gesetz zurückführen können, also auch das Gesetz nicht objectiv gültig als Ursache der Erscheinungen hinstellen können, so hört eben die Möglichkeit auf, solche Erscheinungen zu begreifen.

Wir müssen aber versuchen, sie zu begreifen, wir haben keine andere Methode, sie der Herrschaft unseres Verstandes zu unterwerfen; wir müssen also an ihre Untersuchung gehen mit der Voraussetzung, dass sie zu begreifen sein werden. Somit ist das Gesetz vom zureichenden Grunde eigentlich nichts anderes als der Trieb unseres Verstandes, alle unsere Wahrnehmungen seiner eigenen Herrschaft zu unterwerfen, nicht ein Naturgesetz. Unser Verstand ist das Vermögen, allgemeine Begriffe zu bilden; er findet an unseren sinnlichen Wahrnehmungen und Erfahrungen nichts zu thun, wenn er nicht allgemeine Begriffe, Gesetze, bilden kann, die er dann objectivirt und Ursachen nennt. Wenn sich aber findet, dass die Naturerscheinungen unter einen bestimmten Causalzusammenhang zu subsumiren sind, so ist das allerdings eine objectiv gültige Thatsache, und entspricht objectiven besonderen Beziehungen zwischen den Naturerscheinungen, die wir in unserem Denken als Causalzusammenhang derselben ausdrücken, und eben nicht anders auszudrücken wissen.

Ebenso wie es die eigenthümliche Thätigkeit unseres Auges ist, Lichtempfindung zu haben, und wir deshalb die Welt nur sehen können als Lichterscheinung, so ist es die eigenthümliche Thätigkeit unseres Verstandes, allgemeine Begriffe zu bilden, d. h. Ursachen zu suchen, und er kann die Welt also begreifen nur als causalen Zusammenhang. Neben dem Auge haben wir noch andere Organe für die Auffassung der Aussenwelt, und können deshalb manches fühlen, oder riechen, was wir nicht sehen können. Neben unserem Verstande steht wenigstens für die Auffassung der Aussenwelt kein anderes gleich geordnetes Vermögen da. Was wir also nicht begreifen können, das können wir uns deshalb auch nicht als existirend vorstellen.

Die ältere Geschichte der Lehre von den Sinneswahrnehmungen im Allgemeinen fällt zusammen mit der Geschichte der Philosophie, wie schon am Schlusse des siebzehnten Paragraphen auseinandergesetzt ist. Die Physiologen des 17. und 18. Jahrhunderts kamen mit ihrer Untersuchung meist nur bis zum Netzhautbilde, und glaubten, dass mit dessen Bildung alles abgemacht sei, daher sie denn auch durch die Fragen, warum wir die Gegenstände aufrecht sehen und warum wir sie einfach sehen trotz der Existenz zweier verkehrten Netzhautbilder, nicht wenig in Verlegenheit gesetzt wurden.

Unter den Philosophen hat zuerst Cartesius sich eingehender mit den Gesichtswahrnehmungen beschäftigt mit Berücksichtigung der naturwissenschaftlichen Kenntnisse seiner Zeit. Er erkennt die Qualitäten der Empfindung als wesentlich subjectiv an, hält aber die Anschauungen der quantitativen Verhältnisse der Grösse, Gestalt, Bewegung, Lage, Dauer, Zahl der Gegenstände für objectiv richtig anschaubar. Zur Erklärung der Richtigkeit dieser Vorstellungen nimmt er aber wie die ihm nachfolgenden idealistischen Philosophen ein System angeborener Ideen an, die mit den Dingen übereinstimmten. Diese Theorie wurde dann später am consequentesten und reinsten von Leibnitz entwickelt.

Berkeley untersuchte eingehend den Einfluss des Gedächtnisses auf die Gesichtswahrnehmungen und die inductiven Schlüsse, die dabei vorkommen, von denen er sagt, dass sie so schnell geschehen, dass wir sie nicht bemerken, wenn wir nicht absichtlich darauf achten. Diese empirische Basis führte ihn dann freilich zu der Behauptung, dass nicht blos die Qualitäten der Empfindung, sondern auch die Wahrnehmungen überhaupt nur innere Processe seien, denen nichts äusseres entspräche. Er wird zu dieser Schlussfolgerung verleitet durch den falschen Satz, die Ursache (das wahrgenommene Object) müsse ihrer Wirkung (der Vorstellung) gleichartig, also auch ein geistiges Wesen, nicht ein reales Object sein.

Die Erkenntnisstheorie von Locke leugnete die angeborenen Ideen und suchte alle Erkenntniss auf Empirie zu gründen; das Streben endete aber bei Hume in der Leugnung aller Möglichkeit von objectiver Erkenntniss.

Der wesentlichste Schritt, um die Frage auf den richtigen Standpunkt zu stellen, wurde von KANT in seiner Kritik der reinen Vernunft gethan, in der er allen reellen Inhalt des Wissens aus der Erfahrung ableitete, von diesem aber unterschied, was in der Form unserer Anschauungen und Vorstellungen durch die eigenthümlichen Fähigkeiten unseres Geistes bedingt ist. Das reine Denken *a priori* kann nur formal richtige Sätze ergeben, die als nothwendige Gesetze des Denkens und Vorstellens allerdings absolut zwingend erscheinen, aber keine reale Bedeutung für die Wirklichkeit haben, also auch niemals irgend eine Folgerung über Thatsachen einer möglichen Erfahrung zulassen können.

In dieser Auffassung ist die Wahrnehmung anerkannt als eine Wirkung, welche das wahrgenommene Object auf unsere Sinnlichkeit hat, welche Wirkung in ihren näheren Bestimmungen ebenso gut abhängt von dem Wirkenden wie von der Natur dessen, auf welches gewirkt wird. Auf die empirischen Verhältnisse wurde dieser Standpunkt namentlich von JOH. MÜLLER übertragen in seiner Lehre von den specifischen Energien der Sinne.

Die nachfolgenden idealistischen Systeme der Philosophie von J. G. FICHTE, SCHELLING, HEGEL haben allen Nachdruck wieder darauf gelegt, dass die Vorstellung wesentlich abhängig sei von der Natur des Geistes, und den Einfluss, den das Wirkende auf die Wirkung hat, vernachlässigt. Sie sind deshalb auch für die Theorie der Sinneswahrnehmung von geringem Einflusse gewesen.

KANT hatte Raum und Zeit kurzweg als gegebene Formen aller Anschauung hingestellt, ohne weiter zu untersuchen, wie viel in der näheren Ausbildung der einzelnen räumlichen und zeitlichen Anschauungen aus der Erfahrung hergeleitet sein könnte. Diese Untersuchung lag auch ausserhalb seines Weges. So betrachtete er namentlich die geometrischen Axiome auch als ursprünglich in der Raumanschauung gegebene Sätze, eine Ansicht, über welche sich wohl noch streiten lässt. Seinem Vorgange schlossen sich JOH. MÜLLER und die Reihe von Physiologen an, welche die nativistische Theorie der Raumanschauung auszubilden suchten. JOH. MÜLLER selbst nahm an, dass die Netzhaut in ihrer räumlichen Ausdehnung sich selbst empfinde vermöge einer angeborenen Fähigkeit dazu, und dass die Empfindungen beider Netzhäute hierbei verschmölzen. Als derjenige, welcher in neuerer Zeit am consequentesten diese Ansicht durchzuführen und den neueren Entdeckungen anzupassen gesucht hat, ist E. HERING zu nennen.

Schon vor MÜLLER hatte STEINBUCH eine Herleitung der räumlichen Einzelanschauungen mittels der Bewegungen der Augen und des Körpers versucht. Von philosophischer Seite nahmen HERBART, LOTZE, WAITZ und CORNELIUS dieselbe Aufgabe in Angriff. Von empirischer Seite war es später namentlich WHEATSTONE, welcher durch die Erfindung des Stereoskops einen mächtigen Anstoss zur Untersuchung des Einflusses der Erfahrung auf unsere Gesichtsanschauungen gab. Ausser kleineren Beiträgen, die ich selbst in verschiedenen Arbeiten zur Lösung dieser Aufgabe gegeben habe, sind hier als Versuche, eine empiristische Ansicht durchzuführen, zu nennen: die Schriften von NAGEL, WUNDT, CLASSEN. Das Nähere über diese Untersuchungen und Streitpunkte ist in den folgenden Paragraphen zu erörtern.

1637. CARTESIUS. *Dioptrice. Oeuvres publiés par* V. COUSIN T. V.
1644. CARTESIUS. Principia Philosophiae T. III.
1703. LEIBNITZ. *Nouveaux essais sur l'entendement humain. Opera philos. ed.* ERDMANN. T. I. p. 194.
1709. BERKELEY. *Theory of vision.* London.
1720. LOCKE. *Essai sur l'entendement humain. Trad. de l'Anglais. Londres.* L. II et IV.
HUME. Untersuchungen über den menschlichen Verstand.
1787. J. KANT. Kritik der reinen Vernunft. 2. Aufl. Riga 1787.
1811. STEINBUCH. Beiträge zur Physiologie der Sinne. Nürnberg.
1816. J. F. HERBART. Lehrbuch zur Psychologie. Seine Werke herausgegeben von HARTENSTEIN. Leipzig 1850. Bd. V.
1825. HERBART. Psychologie als Wissenschaft. Sämmtliche Werke. Bd. VI.
1826. JOH MÜLLER. Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig.
1849. TH. WAITZ. Lehrbuch der Psychologie als Naturwissenschaft. Braunschweig.
1852. H. LOTZE. Medicinische Psychologie. Leipzig.
1856. H. LOTZE. Mikrokosmus. Leipzig.
1861. CORNELIUS. Die Theorie des Sehens und räumlichen Vorstellens. Halle.
M. J. SCHLEIDEN. Zur Theorie des Erkennens durch den Gesichtssinn. Leipzig.
A. NAGEL. Das Sehen mit zwei Augen und die Lehre von den identischen Netzhautstellen. Leipzig u. Heidelberg.

1861—64. E. Hering. Beiträge zur Physiologie. Leipzig.
1862. W. Wundt. Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig u. Heidelberg. Abgedruckt aus der Zeitschrift für rationelle Medicin 1858—1862.
1863. A. Classen. Das Schlussverfahren des Sehactes. Rostock.
E. Hering über Dr. A. Classen's Beitrag zur physiologischen Optik. Archiv für pathol. Anatomie und Physiologie. VIII. 2. p. 179.
1864. C. S. Cornelius. Zur Theorie des Sehens. Halle.
J. Dastich. Ueber die neueren physiologisch-psychologischen Forschungen im Gebiete der menschlichen Sinne. Prag.
1866. H. Ulrici. Gott und der Mensch. I. Leib und Seele, Grundzüge einer Psychologie des Menschen. Leipzig.

§. 27. Die Augenbewegungen.

Da die Bewegungen der Augen eine wesentliche Rolle bei der Bildung der Raumanschauungen durch den Gesichtssinn spielen, so müssen wir zunächst mit ihnen näher bekannt werden.

Der Augapfel hat zwar keine aus Knochen fest geformte regelmässige Gelenkhöhle, wie wir sie in den Gelenken der Extremitäten finden; die Augenhöhle, in der er liegt, ist vielmehr, wie *Fig. 17*, S. 28, zeigt, im Ganzen eine Höhlung von der Gestalt einer vierkantigen Pyramide, deren Spitze nach hinten sieht, und welche sich in keiner Weise dem nahehin kugelig geformten Augapfel anschliessen kann. Die Lücken, welche zwischen dem letzteren und den knöchernen Wänden der Höhle bleiben, werden durch sehr fetthaltiges loses Bindegewebe ausgefüllt, in welchem die Muskeln, Nerven, Gefässe des Auges, die Thränendrüse u. s. w. liegen. Verhältnissmässig am engsten sind diese Lücken längs des vorderen Randes der Augenhöhle; es bleibt dort, namentlich nach oben, innen und aussen nur ein ziemlich schmaler Spalt zwischen dem Augapfel und dem Knochen übrig, wie man leicht fühlen kann, wenn man die Fingerspitze dazwischenzuschieben sucht. Man kann dies nicht, ohne sogleich Druckbilder hervorzubringen; nur nach unten und aussen gegen das Jochbein hin ist die Lücke etwas grösser. Dadurch ist nun die weiche Masse von Fett, Muskeln, Nerven, Gefässen und Drüsen, welche hinter dem Augapfel liegt, in eine Höhlung eingeschlossen, welche fast vollständig von festen Wänden umgeben ist, und nur wenige und schmale Spalten von nachgiebigerer Substanz darbietet. Diese Höhlung wird nach hinten und nach den Seiten von den knöchernen Wänden der Augenhöhle, nach vorn durch den Augapfel selbst gebildet. Da nun die genannten organischen Massen, Fett, Muskeln, Nerven u. s. w. fast ganz incompressibel sind, wie das Wasser, welches den grössten Theil ihres Gewichts ausmacht, und weder merklich ausweichen, noch an Volum zunehmen können, so sind zunächst alle Bewegungen des Augapfels an die Bedingung gebunden, dass durch sie das Volumen der hinter dem Augapfel gelegenen Theile nicht verändert werden kann.

Der Augapfel kann also unter normalen Verhältnissen nicht in die Augenhöhle hineindringen oder aus ihr heraustreten, wenigstens nicht bei den schnell wechselnden Zusammenziehungen seiner Muskeln. Wenn Blut stärker in die Gefässe der Augenhöhle eindringt, oder aus ihnen sich entleert, wie es z. B. nach erschöpfenden Krankheiten und im Tode geschieht, so wird dadurch aller-

dings das Volumen der weichen hinter dem Augapfel liegenden Theile verändert, und dieser dringt vor oder zieht sich zurück. Dergleichen Veränderungen können aber bei den willkührlichen Bewegungen des Auges nicht eintreten. Wenn man versucht den Augapfel mit den aufgelegten Fingern in die Augenhöhle zurückzudrängen, so fühlt man gleich einen erheblichen Widerstand, noch ehe eine merkliche Verschiebung des Auges eingetreten ist, und man bemerkt sogleich die subjectiven Erscheinungen, welche der Druck im Auge hervorruft. Dabei sieht man die Weichtheile neben dem Augapfel, namentlich unten hervordrängen; so wie man mit dem Drucke nachlässt, ziehen diese sich aber auch vermöge ihrer elastischen Spannung wieder zurück.

Ebenso wenig kann sich der Augapfel als Ganzes nach rechts und links, oder nach oben und unten verschieben, weil ihm hier überall die benachbarten Theile des vorderen knöchernen Randes der Augenhöhle in den Weg treten.

Dadurch sind also alle Verschiebungen des Augapfels als Ganzes, das heisst, alle Verschiebungen, bei welchen sämmtliche Punkte des Augapfels sich in gleicher Richtung bewegen, unmöglich gemacht, und es bleiben als ausführbar nur Drehungen übrig, das heisst Bewegungen, bei welchen eine Seite des Augapfels in die Augenhöhle hineintritt, während eine andere heraustritt. Im Ganzen hat also die Art, wie der Augapfel eingebettet ist, für die Bewegungen desselben dasselbe mechanische Resultat, als wäre er ein kugeliger Gelenkkopf, in einer kugeligen Pfanne befestigt, wie der Kopf des Oberschenkelbeins.

Wenn der Augapfel also nur drehende Bewegungen ausführen kann, so ist die erste Frage die nach dem Mittelpunkte dieser Drehungen.

Professor JUNGE aus Petersburg hat in meinem Laboratorium den Drehpunkt des Auges zu bestimmen gesucht, indem er beobachtete, um wie viel sich die Lichtreflexe beider Hornhäute einander näherten, wenn die Gesichtslinien aus paralleler Stellung in einen bestimmten Convergenzwinkel übergingen. Es zeigte sich indessen, dass die Ellipticität der Hornhäute einen merklichen Einfluss auf die Berechnung der Resultate hatte, und da es sehr mühsam ist, diese Ellipticität für viele Augen zu bestimmen, so war die Methode nicht eben ausgedehnter Anwendung fähig, obgleich sie übrigens sehr genaue Resultate gab.

DONDERS und DOIJER[1] haben deshalb eine einfachere Methode angewendet, welche sich als zureichend genau bewährte. Es wurde zuerst der horizontale Durchmesser der Hornhaut mit dem Ophthalmometer gemessen, und die Lage der Gesichtslinie gegen die Hornhautaxe bestimmt. Dann wurde ein feiner senkrechter Faden unmittelbar vor dem Auge ausgespannt, und beobachtet, wie weit das Auge nach rechts und links blicken musste, damit bald der eine, bald der andere Rand der Hornhaut hinter den Faden trat. Aus diesem Winkel und der bekannten Breite der Drehungen liess sich dann die Lage des Drehpunkts berechnen. Das Nähere darüber unten.

Danach ergab sich, dass bei 19 normalsichtigen Augen der Drehpunkt zwischen 10,42 und 11,77 Mm. hinter der durch den Rand der Hornhaut gelegten Ebene lag, im Mittel 10,957; oder 13,557 hinter dem Scheitel der

[1] Derde Jaarlijksch Verslag betr. het Nederlandsch Gasthuis voor Ooglijders. Utrecht 1862, p. 209—229.

Hornhaut, und etwa 10 Mm. vor der hinteren Fläche der Sclerotica, der letzteren also etwas näher als der Basis der Hornhaut. Die Lage des Drehpunkts hängt eben hauptsächlich ab von der Form der hinteren Hälfte des Augapfels, weil nur diese in Berührung kommt mit dem widerstehenden weichen Polster, welches den Grund der Augenhöhle ausfüllt. Diese hintere Hälfte des Augapfels scheint bei normalen Augen einem stärker abgeplatteten Ellipsoide anzugehören, als die vordere; der Drehpunkt muss etwa mit dem Mittelpunkte dieses Ellipsoids zusammenfallen.

Kurzsichtige Augen sind nach hinten verlängert; bei ihnen liegt deshalb der Drehpunkt auch weiter nach hinten als bei normalsichtigen. Donders fand ihn im Maximo bis zu 13,26 Mm. hinter der Basis der Hornhaut oder 15,86 hinter ihrem Scheitel liegend. Hyperopische Augen dagegen sind hinten abgeflacht, wobei auch der Drehpunkt ein wenig mehr nach vorn rückt; das Minimum seiner Entfernung von der Basis der Hornhaut betrug 9,71 Mm. oder 12,32 hinter dem Scheitel der Hornhaut.

Ob der Drehpunkt für jede Richtung und Grösse der Drehung ganz constant sei, hat Donders noch nicht untersucht.

Es stellte sich bei diesen Versuchen ferner heraus, dass die normalen Augen mit einer einzigen Ausnahme die für diese Versuche nöthigen Drehungen des Auges, welche 28° nach beiden Seiten hin betrugen, ohne Schwierigkeit ausführen konnten, die kurzsichtigen Augen aber hatten oft eine beschränktere Beweglichkeit; unter den Hyperopen fand sich ebenfalls nur ein Ausnahmsfall mit beschränkterer Beweglichkeit. Doch können die meisten Augen auch wohl noch stärkere Drehungen ausführen. Ich erreiche bei stärkerer Anstrengung in horizontaler Richtung etwa 50 Grad nach beiden Seiten, und etwa 45° nach oben und nach unten, so dass ich von oben nach unten das Auge etwa um einen rechten Winkel, von rechts nach links um etwas mehr drehen kann. Die äussersten Drehungen sind aber schon sehr gezwängt und nicht lange zu ertragen.

Wir gehen jetzt dazu über zu untersuchen, welche Drehungen vom Augapfel ausgeführt werden. In der Art der Befestigung des Augapfels liegt kein Hinderniss für eine jede Art von Drehung von mässiger Amplitüde; die Muskeln sind ebenfalls vorhanden, welche Drehung um jede beliebige Axe würden ausführen können; die genauere Untersuchung der Bewegungen der menschlichen Augen hat aber ergeben, dass unter den gewöhnlichen Umständen des normalen Sehens durchaus nicht alle Bewegungen wirklich ausgeführt werden, zu deren Ausführung die mechanischen Mittel vorhanden sind. Wir werden also zunächst die Frage zu untersuchen haben, welche Bewegungen werden vom menschlichen Auge wirklich ausgeführt?

Bei den Bestimmungen der Lage der Augen und der gesehenen Objecte handelt es sich in der Regel darum, ihre Lage im Verhältniss zu der des Kopfes zu bestimmen, dessen Lage und Richtung im Raume selbst als bekannt angenommen werden muss. Zu diesen Bestimmungen verwenden wir zunächst am passendsten folgende von Henle für die anatomischen Beschreibungen eingeführte Nomenclatur.

Der menschliche Kopf besteht aus zwei symmetrischen Hälften, seine

Mittelebene der Symmetrie nennen wir die Medianebene. Diejenigen Linien, welche entsprechende Punkte der rechten und linken Kopfhälfte verbinden, nennen wir transversale oder quere Linien. Sie sind senkrecht zur Medianebene. Ebenen, welche der Medianebene parallel laufen, heissen Sagittalschnitte.

Als natürliche Stellung des Kopfes kann diejenige betrachtet werden, welche bei aufrechter Haltung des Körpers angenommen wird, wenn die Blicke nach dem Horizont gerichtet sind. Bei dieser Haltung liegt für mich die *Glabella* des Stirnbeins (der Theil dicht über der Nasenwurzel) senkrecht über den Oberzähnen. Diese Stellung ist dadurch allerdings nicht ganz genau, sondern nur annähernd bezeichnet; wie für die Augenbewegungen eine genauere Bestimmung gewonnen werden kann, wird sich später zeigen. Die in dieser Haltung durch den Kopf gelegten horizontalen Ebenen heissen Horizontalschnitte oder Querschnitte, die senkrecht zur Medianebene gelegten verticalen Schnitte dagegen Frontalschnitte. Die Frontalschnitte und Querschnitte schneiden sich in transversalen Linien. Die Linien, in denen sich die Medianebene und die ihr parallelen Sagittalschnitte mit den Querschnitten (Horizontalschnitten) schneiden, heissen sagittale (pfeilrechte) Linien, und diejenigen, in denen sich die Medianebene und die Sagittalschnitte mit den Frontalschnitten schneiden, verticale (senkrechte) Linien. Die transversalen Linien also verlaufen von rechts nach links, die sagittalen von vorn nach hinten, die verticalen von oben nach unten.

So ist ein rechtwinkeliges Coordinatensystem gegeben, welches im Kopfe selbst als fest, und mit ihm beweglich angesehen wird. Die beiden Seiten der Medianebene sind als rechts und links zu bezeichnen, die einer Sagittalebene als innen und aussen, oder wo dies eine Verwechselung in Beziehung auf das Innere von hohlen Organen zulassen würde, nach Henle's Vorschlag als laterale (nach der äusseren Seite sehend) und als mediale (gegen die Medianebene sehend) zu bezeichnen. Die beiden Seiten der transversalen Schnitte werden als oben und unten bezeichnet werden können, oder wo dies bei schiefer Haltung des Kopfes zweideutig sein könnte, als stirnwärts und kinnwärts gekehrt. Die beiden Seiten der Frontalschnitte sind unzweideutig als vorn und hinten zu bezeichnen.

Für die Bewegungen des Auges bildet der Drehpunkt den festen Punkt, und beim normalen Sehen sind beide Augen immer so gestellt, dass sie ein und denselben äusseren Punkt fixiren, welcher Punkt, da das Sehen mit bewegtem Auge Blicken genannt wird, der Blickpunkt heissen mag (sonst auch Fixationspunkt genannt). Eine gerade Linie, welche vom Blickpunkte nach dem Drehpunkte des Auges gezogen ist, nennen wir Blicklinie. Sie ist nicht ganz identisch mit der Gesichtslinie, die dem ungebrochenen Lichtstrahle entspricht, sondern muss etwas auf deren innerer (medialer) Seite liegen, da der Drehpunkt vermuthlich in der Augenaxe, und somit medianwärts von der Gesichtslinie liegt. Doch wird die Abweichung beider Linien von einander in den meisten Fällen zu vernachlässigen sein. Ein Lichtstrahl, der der Blicklinie folgt, muss wie alle vom Blickpunkte ausgehenden Strahlen

schliesslich durch das Centrum des gelben Flecks gehen, und wird deshalb nicht in der Verlängerung der Blicklinie bleiben können,

Eine Ebene, welche durch die beiden Blicklinien gelegt ist, werde Blickebene genannt (der Name der Visirebene, der hierfür auch gebraucht ist, wird wohl besser für die Ebene, in der die Visirlinien liegen, aufgespart; übrigens wird der Unterschied zwischen Blickebene und Visirebene in der Regel zu vernachlässigen sein). Die Verbindungslinie der Drehpunkte, welche mit den beiden Blicklinien ein Dreieck einschliesst, ist als Basis dieses Dreiecks betrachtet, und dem entsprechend Grundlinie (Basallinie) genannt worden. Die Medianebene des Kopfes schneidet die Grundlinie in ihrem Mittelpunkte, und die Blickebene in der Medianlinie der Blickebene.

Der Blickpunkt kann gehoben und gesenkt, das heisst stirnwärts oder kinnwärts bewegt werden. Das Feld, welches er durchlaufen kann, nennen wir das Blickfeld; seine Ausdehnung ist geringer als die des Gesichtsfeldes. Wir denken uns das Blickfeld als Theil einer Kugeloberfläche, deren Mittelpunkt im Drehpunkt liegt. Nehmen wir eine bestimmte Lage der Blickebene, die anfangs willkührlich gewählt, später näher bestimmt werden mag, als ihre Anfangslage an, so ist jede neue Lage der Blickebene zu bestimmen durch den Winkel, den sie mit der Anfangslage bildet, und den wir den Erhebungswinkel des Blicks nennen wollen. Derselbe ist positiv zu rechnen, wenn die Blickebene stirnwärts, negativ, wenn sie kinnwärts verschoben ist.

In der Blickebene kann sich nun die Blicklinie jedes Auges lateralwärts oder medianwärts wenden; wir bezeichnen dies als Seitenwendungen des Blicks, und messen ihre Grösse durch den Seitenwendungswinkel, das heisst durch den Winkel, den die Richtung der Blicklinie mit der Medianlinie der Blickebene bildet. Wendungen nach rechts mögen einen positiven Werth des Seitenwendungswinkels haben, Wendungen nach links einen negativen Werth.

Durch den Erhebungswinkel und den Seitenwendungswinkel ist die Richtung der Blicklinie gegeben. Fick, Meissner, Wundt haben dazu zwei andere Winkel benutzt. In den von mir gebrauchten Bestimmungen wird die Blicklinie erst mit der Blickebene gehoben, und dann in der Blickebene seitwärts gewendet. Fick setzt die Blickebene zuerst als horizontal voraus, und die Blicklinie in ihr horizontal verschoben um einen Winkel, den er die *Longitudo* nennt, indem er die Verticalaxe des Auges mit der Polaraxe eines Erdglobus vergleicht. Dann lässt er die Blicklinie erst heben um einen Winkel, den er die *Latitudo* nennt. Bei dieser Messung sind aber sowohl die *Longitudo* als *Latitudo* in ihrem Werthe abhängig von der gewählten Anfangslage der Blickebene, für welche man von vorn herein keine genügend feste Bestimmungsweise hat, und jede Aenderung dieser Anfangslage macht trigonometrische Berechnungen für die beiden andern Winkel nöthig. Dagegen ist der von mir gewählte Seitenwendungswinkel ganz unabhängig von der Wahl der Anfangslage der Blickebene, und der Erhebungswinkel ist einfach durch Addition oder Subtraction zu corrigiren, wenn man zu einer anderen Wahl seines Nullpunkts übergeht.

Durch die genannten Winkel ist nun die Lage der Blicklinie vollständig gegeben, aber noch nicht die Stellung des Auges. Der Augapfel würde vielmehr noch beliebige Drehungen um die Blicklinie als Axe machen können, ohne dass diese ihre Lage dabei ändert. Solche Drehungen des Augapfels um die Blicklinie als Axe pflegt man Raddrehungen zu nennen, weil die Iris sich dabei dreht, wie ein Rad. Um die Grösse der Raddrehung zu messen, muss der Winkel bestimmt werden, den eine im Auge feste Ebene mit der Blickebene macht. Als solche habe ich die Ebene gewählt, welche mit der Blickebene zusammenfällt, wenn der Blick beider Augen der Medianebene parallel in aufrechter Kopfhaltung nach dem unendlich entfernten Horizonte gerichtet ist, und habe diese im Auge feste Ebene den Netzhauthorizont genannt. Ich fand diese Bestimmung unzweideutig bei meinem eignen und bei denjenigen normalsichtigen Augen, die ich untersuchte. Sie ist es aber nicht, wie sich später herausgestellt hat, bei kurzsichtigen Augen, und muss also bei solchen entweder eine genau bestimmte Anfangslage der Blickebene festgesetzt werden, oder würde es für die später zu machenden Anwendungen vielleicht vortheilhaft sein, für solche Augen diejenige Lage der Blickebene zu benutzen, bei welcher die in der Blickebene liegenden geraden Linien sich auf correspondirenden Stellen beider Netzhäute abbilden, was bei den normalsichtigen in der oben genannten der Medianebene parallelen Richtung des Blicks Regel zu sein scheint. Den Winkel zwischen dem Netzhauthorizonte und der Blickebene nennen wir den Raddrehungswinkel des Auges, und nehmen ihn positiv, wenn das obere Ende des verticalen Meridians der Netzhaut nach rechts abgewichen ist. Dabei dreht sich das Auge wie der Zeiger einer von ihm betrachteten Uhr.

Wir wollen zunächst die Gesetze für diejenigen Bewegungen beider Augen untersuchen, bei denen beide Blicklinien fortdauernd parallel gerichtet bleiben, wie sie ausgeführt werden, wenn man eine Reihe weit entfernter Gegenstände überblickt. Bei Convergenz der Augen treten kleine Abweichungen von dem Gesetze ein, welches für parallele Gesichtslinien gilt.

Das erste von Donders aufgestellte und durch alle späteren Untersuchungen bestätigte Gesetz ist, dass, wenn die Lage der Blicklinie in Beziehung zum Kopfe gegeben ist, dazu auch ein bestimmter und unveränderlicher Werth der Raddrehung gehört, welcher unabhängig von der Willkühr des Beobachters und unabhängig von dem Wege ist, auf welchem die Blicklinie in die betreffende Stellung gebracht ist. Ausgedrückt in der von uns gewählten Bezeichnungsweise, heisst dieses Gesetz:

Der Raddrehungswinkel jedes Auges ist bei parallelen Blicklinien eine Function nur von dem Erhebungswinkel und dem Seitenwendungswinkel,

Donders hat namentlich entgegen der von Hueck früher aufgestellten Meinung gezeigt, dass der Werth der Raddrehung nicht wechselt bei geänderter Neigung des Kopfes, wenn dabei die Stellung der Blicklinie zum Kopfe unverändert bleibt. Er hatte die Stellung jedes einzelnen Auges auch für unabhängig von der Stellung des andern Auges gehalten. Indessen hat Volkmann

allerdings einen, wenn auch geringen Einfluss der Convergenz wenigstens für kurzsichtige Augen nachgewiesen, den wir nachher besprechen werden. Aber auch abgesehen davon hat Ermüdung der Augenmuskeln durch länger eingehaltene Convergenzstellungen einigen Einfluss, und ausserdem kann unter besonderen ebenfalls nachher zu besprechenden Umständen das Streben, die Objecte einfach zu sehen, unter Bedingungen, wo man dies nur mittels abnormer Augendrehungen erreichen kann, nicht sogleich, aber nach einiger Zeit einen Einfluss auf die Stellung des Auges ausüben. Kleine Veränderungen treten auch von einem zum anderen Tage ein. Aber alle diese Abweichungen sind gering und beeinträchtigen der Hauptsache nach nicht die Geltung des Donders'schen Gesetzes.

Die Hauptzüge des Gesetzes der Augendrehungen, welche allen Augen gemeinsam sind, lassen sich unter folgende Gesichtspunkte zusammenfassen.

Es ist unter den verschiedenen Augenstellungen eine herauszufinden von der Art, dass wenn von ihr aus der Blick gerade nach oben oder gerade nach unten, gerade nach rechts oder nach links gewendet wird, keine Raddrehung des Auges erfolgt. Diese Stellung nennen wir die Primärstellung der Blicklinie. Wenn man also von der Primärstellung ausgeht, so bringt reine Erhebung oder Senkung des Auges ohne Seitenabweichung, oder reine Seitenabweichung ohne Erhebung und ohne Senkung keine Raddrehung hervor.

Die Lage der Blickebene, welche durch die Primärstellungen beider Blicklinien geht, nennen wir die Primärstellung der Blickebene.

In erhobener Stellung der Blickebene geben Seitenwendungen nach rechts Drehungen des Auges nach links und Seitenwendungen nach links Drehungen nach rechts.

In gesenkter Stellung der Blickebene dagegen geben Seitenwendungen nach rechts auch Drehungen nach rechts und Seitenwendungen nach links Drehungen nach links.

Oder: Wenn der Erhebungs- und Seitenwendungswinkel dasselbe Vorzeichen haben, ist die Drehung negativ, wenn jene ungleiches Vorzeichen haben, ist die Drehung positiv.

Bei gleicher Erhebung oder Senkung ist die Rotation um so stärker, je grösser die seitliche Abweichung, und bei gleicher Seitenwendung um so stärker, je grösser die Erhebung oder Senkung ist.

Um sich von den angegebenen Thatsachen zu überzeugen, benutzt man nach dem von Ruete zuerst gemachten Vorschlage am besten Nachbilder. Zu dem Ende stelle man sich der Wand eines Zimmers gegenüber auf, welche mit einer Tapete überzogen ist, die horizontale und verticale Linien erkennen lässt, ohne dass aber das Muster so scharf gezeichnet ist, dass man Schwierigkeit fände, Nachbilder auf ihm zu erkennen; am besten ist eine matte blassgraue Grundfarbe. Dem Auge des Beobachters gerade gegenüber und in gleicher Höhe mit ihm spanne man ein horizontales schwarzes oder farbiges Band auf, zwei bis drei Fuss lang, welches stark gegen die Farbe der Tapete absticht.

Um die Lage des Kopfes zu sichern, ist es vortheilhaft, den Hinterkopf fest anzulehnen, wobei man darauf zu achten hat, dass derselbe weder nach rechts noch nach links geneigt oder gedreht sei. Es muss vielmehr die Mittelebene des Kopfes vertical gehalten werden und senkrecht zur betrachteten Wand stehen. Ob die Mittelebene des Kopfes vertical sei, erkennt man leicht, wenn man die Augen so convergiren lässt, dass Doppelbilder des schwarzen Bandes entstehen; diese müssen in eine gerade Linie zusammenfallen. Man fixire nun eine kurze Zeit lang ganz fest die Mitte des Bandes, und wende dann, ohne den Kopf zu verrücken, plötzlich die Augen nach einer anderen Stelle der Wand hin. Man wird dort ein Nachbild des Bandes sehen, und durch Vergleichung dieses Bildes mit den horizontalen Linien der Tapete erkennen können, ob das Nachbild horizontal erscheint, oder nicht. Das Nachbild selbst ist entwickelt auf denjenigen Punkten der Netzhaut, die dem Netzhauthorizonte angehören, und bezeichnet bei den Bewegungen des Auges diejenigen Theile des Gesichtsfeldes, auf welche der Netzhauthorizont sich projicirt. Die Schnittlinie der Blickebene mit der gegenüberliegenden Wand dagegen muss immer horizontal sein, wenn der Kopf des Beobachters die verlangte Stellung hat, so dass die Verbindungslinie der Drehpunkte beider Augen selbst horizontal und der Ebene der Wand parallel ist. Die horizontalen Linien der Tapete geben also die Projection der Blickebene auf die Tapete, und wie das Nachbild gegen diese Horizontallinien gedreht ist, so ist der Netzhauthorizont gegen die Blickebene gedreht.

Wir finden, dass wenn man bei richtig gewählter Stellung des Kopfes gerade nach oben und unten, oder gerade nach rechts und links sieht, das Nachbild des horizontalen Bandes mit den horizontalen Linien der Tapete zusammenfällt. Wenn man aber nach r e c h t s u n d o b e n oder nach l i n k s u n d u n t e n blickt, so ist es nach l i n k s gedreht, d. h. sein linkes Ende steht tiefer als das rechte, immer im Vergleich zu den Horizontallinien der Tapete, und wenn man nach l i n k s o b e n oder r e c h t s u n t e n blickt, ist das Nachbild umgekehrt etwas nach rechts gedreht, sein rechtes Ende steht tiefer als das linke.

Der Sinn dieser Drehungen ist genau derselbe für das rechte wie für das linke Auge, wovon man sich am leichtesten und vollkommensten überzeugt, wenn man beide Augen gleichzeitig öffnet, während man das Nachbild hervorbringt, dann die Richtung des Blicks ändert, und während man das Nachbild betrachtet, schnell hinter einander bald das rechte, bald das linke Auge mit der Hand verdeckt. Welches man auch verdecken möge, so behält das Nachbild bei den von mir untersuchten normalsichtigen Augen vollkommen dieselbe Stellung.

Wenn man das Band vertical ausspannt, und in derselben Weise das Nachbild des verticalen Bandes mit den Verticallinien der Tapete vergleicht, so erhält man scheinbar entgegengesetzte Drehungen. Wenn man nämlich nach rechts und oben sieht, erscheint das Nachbild gegen die Verticallinien der Tapete nicht nach links, sondern umgekehrt nach rechts gedreht. Daraus darf man aber nicht auf eine Drehung des Auges nach rechts schliessen, weil in diesem Falle die verticalen Linien der Tapete nicht mit der Projection einer auf der Blick-

ebene errichteten Normalen zusammenfallen, diese letztere vielmehr in demselben Sinne, wie das Nachbild, nur noch stärker gedreht erscheinen würde.

Der ganze Gang der Erscheinung nach dem für normalsichtige Augen gültigen Gesetze ist in *Fig. 154* dargestellt worden. Es wird vorausgesetzt, dass das Auge sich in der Normale über a befinde in einer Entfernung gleich AB. Dann fallen die Nachbilder einer durch a gehenden horizontalen Linie, wenn sie auf einen andern Theil des Feldes projicirt werden, mit der Richtung der Curven $b_1 b_1$, $b_2 b_2$ etc. zusammen; die einer senkrechten durch a gehenden Linie dagegen mit der Richtung der Curven cc, $c_1 c_1$, $c_2 c_2$ etc. Die Curven sind für normale Augenbewegungen Hyperbeln.

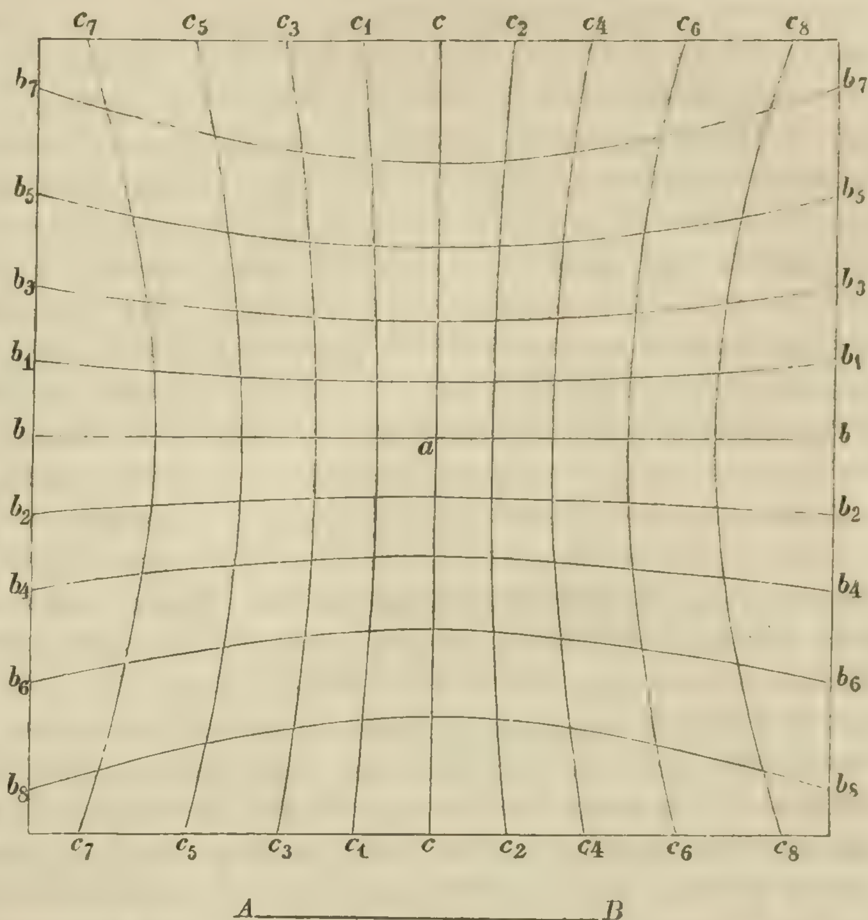
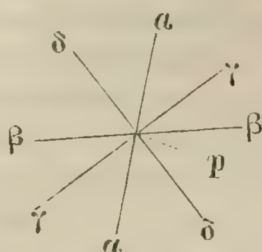


Fig. 154.

Da nun, wenn man von der Primärstellung ausgeht und den Blick schief nach oben oder unten wendet, die Nachbilder verticaler Linien, verglichen mit den Verticallinien der Wand, scheinbar die entgegengesetzte Drehung erleiden als die horizontalen Nachbilder im Vergleich mit horizontalen Linien der Wand, so darf man sogleich vermuthen, dass zwischen horizontalen und verticalen Linien mitten inne für jede Augenbewegung eine Richtung des Nachbilds existiren wird, wobei es der Richtung seines Objects parallel bleibt; und in der That ist das auch der Fall. Man findet nämlich, dass die Nachbilder schräger Linien, die man in der Primärlage fixirt hat, ihrem Object parallel bleiben, wenn man den Blick entweder in der Verlängerung der Objectlinie, oder von der Primärlage ausgehend senkrecht zu dieser wandern lässt.

Es sei also in *Fig. 155* (S. 466) o der Punkt, wo die Blicklinie in der Primärstellung die Ebene der Zeichnung senkrecht schneidet; aa sei eine verticale, bb eine horizontale durch o gezogene Linie. Wird der Blick nach p gewendet, so erhalten ihre Nachbilder die Lagen $\alpha\alpha$ und $\beta\beta$, welche beide den Linien aa, beziehlich bb nicht parallel sind. Zieht man aber durch o die Linien cc und dd, von denen die erstere die Richtung der Verbindungslinie op

hat, die zweite senkrecht darauf ist, so geben diese in p Nachbilder $\gamma\gamma$ und $\delta\delta$, welche ihren Objectlinien parallel sind.



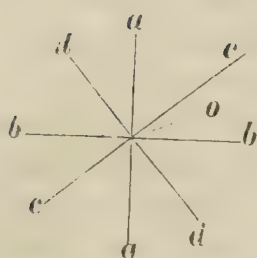


Fig. 155.

Bei den von mir untersuchten Augen schien dieses Gesetz mit desto grösserer Schärfe erfüllt zu sein, je weniger kurzsichtig sie waren.

In dem in *Fig. 155* angedeuteten Versuche ergiebt also die Beobachtung, dass sich die Linien $\delta\delta$ und $\gamma\gamma$, wenn der Blick nach p gewendet ist, auf denselben Netzhauttheilen abbilden, auf denen sich dd und cc abbilden, wenn der Blick nach o gewendet ist. Fragt man nun, um was für eine Rotationsaxe der Augapfel gedreht werden müsse, um aus der ersten Lage in die zweite überzugehen, so ergiebt sich leicht, dass die Axe parallel den Linien dd und $\delta\delta$ sein müsse, und daher senkrecht zu der durch op und den Drehpunkt gelegten Ebene. Denkt man sich diese letztere Ebene in fester Lage zum Augapfel, so wird ihre Lage nicht geändert, wenn sie mit dem Augapfel um eine zu ihr normal gerichtete Axe gedreht wird. Ihre Schnittlinie mit der Ebene der Zeichnung op bleibt deshalb bei solcher Bewegung ebenfalls ungeändert, und diese Schnittlinie, zu deren Theilen auch cc und $\gamma\gamma$ gehören, bildet sich dabei immer auf den gleichen Netzhauttheilen ab, wie es die Ergebnisse des Versuchs erfordern. Denkt man aber durch die Axe und die ihr parallele Linie dd eine Ebene gelegt, und diese um die Axe gedreht, so wird auch nach der Drehung die Schnittlinie $\delta\delta$ dieser Ebene und der Ebene der Zeichnung parallel der Axe und also auch parallel der Linie dd bleiben müssen. Denn wenn eine Ebene durch eine gerade Linie (Rotationsaxe) geht, welche einer andern Ebene (der Ebene der Zeichnung) parallel ist, so ist auch die Schnittlinie beider Ebenen der genannten Linie (Rotationsaxe) parallel.

Wir können also das Bewegungsgesetz parallel gerichteter normalsichtiger Augen folgendermassen aussprechen: Wenn die Blicklinie aus ihrer Primärstellung übergeführt wird in irgend eine andere Stellung, so ist die Raddrehung des Augapfels in dieser zweiten Stellung eine solche, als wäre er um eine feste Axe gedreht worden, die zur ersten und zweiten Richtung der Blicklinie senkrecht steht.

Dieses Gesetz der Augenbewegungen ist in dieser Weise zuerst von Listing aufgestellt worden und wird deshalb nach ihm benannt.

Es ist dabei nicht nöthig, dass die Bewegung des Blicks aus der ersten in die zweite Richtung wirklich längs einer geraden Linie vor sich geht, oder dass der Augapfel wirklich um eine constant bleibende Rotationsaxe gedreht

wird, sondern die Ueberführung aus der ersten in die zweite Stellung kann auf beliebigem Wege geschehen; nach dem Gesetze von Donders wird die endliche Stellung doch immer die gleiche sein, und die Richtigkeit von diesem Donders'schen Gesetze lässt sich wiederum in der Art erweisen, dass man die Ueberführung des Blicks absichtlich auf verschiedenen Wegen vornimmt und sich durch die Congruenz des Nachbildes $\gamma\gamma$ mit der Linie *op* von der Identität der schliesslich eingetretenen Raddrehung des Auges überzeugt.

Doch ist dabei allerdings zu bemerken, dass im ersten Augenblicke, wo die Blicklinie nach ausgiebigen Bewegungen an dem neu gewählten Fixationspunkte angekommen ist, zuweilen noch eine etwas abweichende Stellung des Nachbildes zu bemerken ist, die aber schon nach einer oder zwei Secunden in die normale übergeht.

Wenn man nach dem durch solche Versuche bestätigten Gesetze von Listing die Grösse des Rotationswinkels γ berechnet, ausgedrückt durch den Erhebungswinkel α, und die Seitenwendung β, so findet man folgende Gleichung:

$$-\operatorname{tang.}\gamma = \frac{\sin\alpha\,\sin\beta}{\cos\alpha + \cos\beta}$$

oder für logarithmische Rechnung geeigneter

$$-\operatorname{tang.}\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \operatorname{tang.}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\operatorname{tang.}\left(\frac{\beta}{2}\right).$$

In der folgenden Tabelle sind die Werthe des Drehungswinkels von 5 zu 5 Graden der beiden andern Winkel berechnet.

Seitenwendung	Erhebungswinkel							
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
5°	0° 13′	0° 26′	0° 40′	0° 53′	1° 7′	1° 20′	1° 35′	1° 49′
10°	0° 26′	0° 53′	1° 19′	1° 46′	2° 13′	2° 41′	3° 10′	3° 39′
15°	0° 40′	1° 19′	1° 59′	2° 40′	3° 21′	4° 2′	4° 45′	5° 29′
20°	0° 53′	1° 46′	2° 40′	3° 34′	4° 29′	5° 25′	6° 22′	7° 21′
25°	1° 7′	2° 13′	3° 21′	4° 29′	5° 38′	6° 48′	8° 0′	9° 14′
30°	1° 21′	2° 41′	4° 2′	5° 25′	6° 48′	8° 13′	9° 39′	11° 8′
35°	1° 35′	3° 10′	4° 45′	6° 22′	8° 0′	9° 39′	11° 21′	13° 6′
40°	1° 49′	3° 39′	5° 29′	7° 21′	9° 14	11° 8′	13° 6′	15° 5′.

Für diejenigen Bewegungen des Blicks also, welche von der Primärlage anfangen, und in irgend eine andere Lage überführen, ist nach dem Listing'schen Gesetze die Drehungsaxe immer gelegen in einer Ebene, die zur Blicklinie senkrecht ist. Es gehe diese Ebene der Drehungsaxen durch *AA*, *Fig. 156* (S. 468), normal zu *OB*, der Blicklinie. Eine zweite Ebene, 𝔄, welche in der Primärstellung des Auges mit der Ebene *AA* zusammenfällt, denke man sich durch den Augapfel gelegt und mit diesem fest verbunden. Wenn nun die Blicklinie *OB* in eine Secundärstellung *OF* gebracht ist, hat 𝔄 eine andere Lage als *AA*, nämlich *CC*. Um von dieser ersten Secundärstellung in irgend welche andere Stellungen überzugehen, kann man das Auge nun wieder um

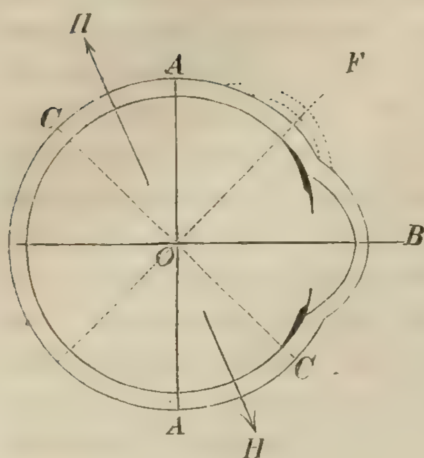


Fig. 156.

feste Axen drehen, die auch alle in einer und derselben Ebene liegen, und zwar in derjenigen Ebene, welche den Winkel der Ebenen AA und CC halbirt, die also die Ebene der Zeichnung rechtwinklig in der Linie HH schneidet. Es ist dies die Ebene der Drehungsaxen für die betreffende Secundärstellung der Blicklinie OF.

Endlich um von irgend einer Stellung a des Augapfels in eine andere Stellung b überzugehen, construire man die Ebenen der Drehungsaxen für die beiden Stellungen a und b. Die Schnittlinie beider Ebenen ist die Axe, um welche man das Auge zu drehen hat, um es von a nach b überzuführen. Denn es ist evident, dass diese Axe beiden Ebenen angehören muss, da man dieselbe Bewegung auch von b nach a machen kann, und die betreffende Drehungsaxe sowohl den Bedingungen der von a als der von b ausgehenden Bewegungen genügen muss, d. h. in den beiden Blickpunkten zugehörigen Ebenen der Drehungsaxen liegen muss.

Bei den bisher geprüften normalsichtigen oder schwach kurzsichtigen Augen bewährte sich die Richtigkeit des Listing'schen Gesetzes mit grosser Genauigkeit für alle parallelen Stellungen beider Blicklinien. Die Methode der Nachbilder erlaubt bei guter Ausführung die Stellung des Augapfels bis auf etwa einen halben Winkelgrad genau zu bestimmen. Eine andere Methode, welche auf der Vergleichung der Bilder beider Augen beruht, und die zuerst von Meissner angewendet und später von Volkmann weiter ausgebildet ist, erlaubt noch genauere Bestimmungen bis auf etwa $^1/_{10}$ Grad herab zwar nicht für die Stellung jedes einzelnen Augapfels, aber doch für die Differenzen der Stellung beider Augen. Versuche nach dieser Methode, deren Ausführung unten näher beschrieben wird, zeigen für meine eigenen Augen in den äussersten peripherischen Stellungen nach oben und unten Abweichungen vom Listing'schen Gesetz, die für jedes einzelne Auge nur neun Winkelminuten betragen. Volkmann fand für seine etwas kurzsichtigeren Augen Maximalabweichungen beim Blick schräg nach unten rechts und links bis zu 54 Minuten für beide Augen zusammen, was auf jedes einzelne etwa 27 Minuten ausmacht. Stärker kurzsichtige Augen, wie die von Herrn Dr. Berthold zeigten aber stärkere Abweichungen namentlich in den peripherischen Stellungen nach oben und unten, die wahrscheinlich mit mechanischen Hindernissen in der Bewegung des nach hinten verlängerten kurzsichtigen Augapfels zusammenhängen werden.

Die bisherigen Angaben beziehen sich auf parallele Stellungen beider Blicklinien. Merkliche Abweichungen davon, bei verschiedenen Individuen von verschiedener Grösse, treten nun nach einer Entdeckung von Volkmann ein, wenn die Blicklinien convergent gestellt werden zur Betrachtung eines nahen Gegenstandes. Bei Volkmann's eigenen Augen bringt Convergenz auf die Punkte einer in 30 Centimetern vor den Augen liegenden Ebene eine gleichmässige Vermehrung der Divergenz der scheinbar verticalen Meridiane beider Augen

von zwei Graden hervor, wenn man sie vergleicht mit der Divergenz, welche die genannten Meridiane nach dem LISTING'schen Gesetze hätten haben sollen, unter Voraussetzung derselben Divergenz und derselben Primärlage, welche bei parallelen Augenstellungen gefunden waren. So weit also der Einfluss der Convergenz sichtbar wird in der veränderten Differenz der Stellung beider Augen, könnte man für VOLKMANN's Augen sich vorstellen, dass dieselben in Convergenz eine tiefere Primärstellung haben, oder dass die Drehung des Auges in der Primärstellung, welche wir als Nullpunkt der Raddrehungen betrachten, verändert ist. Diese Veränderung nimmt zu mit steigender Convergenz.

Für meine eigenen Augen ist diese Drehung durch Convergenz in den mittleren Theilen des Gesichtsfeldes viel geringer als bei VOLKMANN, nämlich nur $1/_9$ der Grösse, die sie bei jenem hat, so dass sie mir bei den Nachbildversuchen verborgen blieb; geschieht übrigens in demselben Sinne. Dagegen fand ich bei Nachbildversuchen, dass in den peripherischen seitlichen Richtungen des Blicks durch Convergenz Abweichungen des Nachbildes von 2^0 bis $2^1/_2{}^0$ eintreten in dem Sinne, als wäre die Primärstellung meiner Augen für die Convergenzstellungen ein wenig tiefer zu nehmen, als für die Parallelstellungen. In *Fig. 157* bezeichnen die kurzen dicken Striche die Lage der Nachbilder für convergente Augenstellungen, aber mit übertriebener Grösse der Abweichung. Die Objecte jener Nachbilder hatten im Centrum gelegen und waren den ausgezogenen Radien des Gesichtsfelds parallel gewesen, so dass ihre Nachbilder bei parallelen Gesichtslinien auch in den genannten Radien liegen geblieben wären. Bei *cd* sind die Abweichungen am deutlichsten, bei *fg* klein und unsicher.

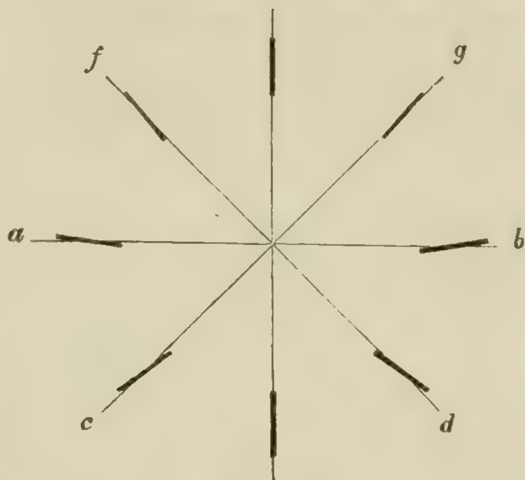


Fig. 157.

Herr DASTICH, dem die übrigen entsprechenden Beobachtungen sehr gut gelangen, konnte gar keinen Einfluss der Convergenz bei seinen Augen finden. Ueber die Grösse dieses Einflusses bei verschiedenen Individuen sind also noch weitere Untersuchungen nöthig.

Ueberhaupt muss ich bemerken, dass für meine Augen sich eine gewisse Veränderlichkeit der Drehungen herausstellt. Die Primärstellung liegt an einem Tage ein wenig höher, am andern tiefer, und verändert sich sogar, während ich eine Reihe von Versuchen ausführe. Namentlich für die peripherischen Richtungen des Blicks, die mit einiger Anstrengung verbunden sind, finde ich zuweilen merklich verschiedene Stellungen in unmittelbar auf einander folgenden Versuchen und trotz möglichster Gleichartigkeit ihrer Ausführung. Man muss also von dem Auge nicht ganz dieselbe Präcision der Bewegung erwarten, wie von einem physikalischen Apparate, wenn auch normale Augen unter gewöhnlichen Bedingungen ziemlich genau dem DONDERS'schen und LISTING'schen Gesetze folgen.

Endlich ist noch der Antheil zu bestimmen, den die einzelnen Augenmuskeln an den einzelnen normalen Bewegungen des Auges zu nehmen haben. Wie oben (S. 28) schon bemerkt ist, drehen der innere und äussere gerade Augenmuskel, für sich wirkend, das Auge um eine verticale Axe; die Axe für die Drehung durch den unteren und oberen geraden Muskel liegt nach den Bestimmungen von Ruete horizontal, mit dem inneren Ende nach vorn sehend, unter einem Winkel von etwa 70° mit der Blicklinie; die Axe für den oberen und unteren schiefen Muskel liegt ebenfalls horizontal, das äussere Ende nach vorn sehend, unter einem Winkel von etwa 35° mit der Blicklinie. Drehungen um die verticale Axe des innern und äussern geraden Muskels entsprechen dem Gesetze von Listing, diese Muskeln können also auch isolirt angewendet werden. Dagegen würden Drehungen um die beiden andern Axen dem Listing'schen Gesetze nicht entsprechen. Um für eine Bewegung nach oben eine horizontal von rechts nach links gerichtete Drehungsaxe zu erhalten, muss man eine Drehung durch den *Rectus superior* mit einer durch den *Obliquus inferior* verbinden; für eine Drehung nach unten den *Rectus inferior* mit dem *Obliquus superior*. Es ist ein bekanntes mechanisches Gesetz, dass man für kleine Drehungen die Drehungsaxen nach dem Gesetz des Parallelogramms der Kräfte zusammensetzen kann, wobei die Grösse der Drehung die Intensität der Kraft repräsentirt, und alle Drehungen, die vom Mittelpunkt aus gesehen nach rechts herum (wie der Zeiger einer Uhr) vor sich gehen, als positiv, die entgegengesetzten als negativ gerechnet werden. In *Fig. 158* ist ein horizontaler Querschnitt des Auges gezeichnet mit den Drehungsaxen, wobei die positiv zu rechnenden Enden der Axen mit den Anfangsbuchstaben der betreffenden Muskeln, *Obliquus superior* und *inferior*, *Rectus superior* und *inferior* bezeichnet sind. Ausserdem ist die nach dem Listing'schen Gesetz geforderte Horizontalaxe OU für die Bewegungen nach oben und unten angegeben; der Buchstabe O bezeichnet das positive Ende der Axe für die Drehung nach oben, U für die nach unten. Die Zeichnung entspricht dem linken Auge von oben gesehen, oder dem rechten von unten.

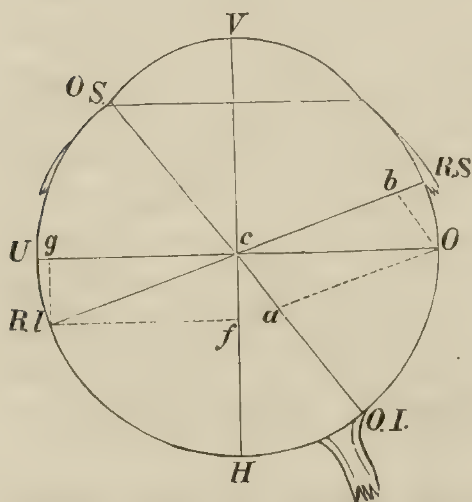


Fig. 158.

Wenn nun das Linienstück cb der Grösse der Drehung durch den *Rectus superior* proportional ist, ca der durch den *Obliquus inferior*, so bezeichnet cO, als Diagonale des Parallelogramms $cbOa$ die Richtung der gemeinsamen Drehungsaxe und ist der Grösse dieser Drehung proportional. Es erhellt aus dieser Figur, dass bei derjenigen Lage, welche die Axen bei geradeaus gerichtetem Auge haben, die resultirende Drehungsaxe UO der Axe der betreffenden beiden geraden Augenmuskeln näher liegt, als derjenigen der schiefen Muskeln. Dadurch wird denn die Seite bc des Parallelogramms grösser als ca, das heisst der betreffende gerade Muskel muss eine stärkere Anstrengung machen, als der mitwirkende schiefe Muskel. Wenn

sich der Augapfel aber nach innen dreht, nähert sich die der veränderten Sehstellung zugehörige Drehungsaxe *UO* mehr der Axe der schiefen Muskeln so dass bei Convergenz der Augen die letzteren verhältnissmässig mehr in Anspruch genommen werden müssen als bei Parallelismus der Blicklinien.

Es ist hierbei zu bemerken, dass die Augenmuskeln alle einen ziemlich breiten Ansatz am Augapfel haben, wobei ihre Fasern sich sogar etwas fächerförmig ausbreiten. Dies hat zur Folge, dass selbst wenn der Augapfel sich ziemlich bedeutend aus seiner Primärstellung gedreht hat, doch die Drehungsaxen für die einzelnen Muskeln ihre Lage im Raume nicht erheblich verändern. Nehmen wir als Beispiel den *Rectus superior* und *inferior*, welche sich oberhalb der Hornhaut, etwa 7 Millimeter von deren Rande entfernt inseriren (Taf. I. *Fig. 1* bei *m* und *n*), so spannen sich, wenn das Auge nach innen gedreht ist, bei der Verkürzung des Muskels vorwiegend die Fasern der Sehne, welche nach dem äusseren Rande der Hornhaut hin gerichtet sind, weil diese am meisten verlängert sind. Man kann sich davon an Präparaten des Augapfels mit seinen Muskeln leicht überzeugen. Wenn sich das Auge nach aussen dreht, wirken dagegen hauptsächlich die inneren Stränge beider Sehnen. So bleibt die Richtung des Muskelzuges dieselbe trotz der veränderten Stellung des Auges.

Diese aus der Anordnung der Muskeln gezogenen Schlüsse werden bestätigt durch die Erfahrungen, welche bei krankhafter Lähmung einzelner Muskeln beobachtet worden sind. Wenn zum Beispiel der obere schiefe Muskel gelähmt ist, so kann der innere gerade Muskel, allein wirkend, das Auge noch nach unten wenden. Aber Drehung um die Axe *RI* giebt nicht bloss eine resultirende Drehung nach der Axe *CU*, entsprechend der Länge *cg* in *Fig. 158*, wie sie verlangt wird, sondern auch eine kleinere, entsprechend der Länge *cf*, nach der Axe *CH*, welche also einer negativen Drehung, einer Drehung nach links herum um die Blicklinie entspricht. Dabei erleiden dann die Objecte im Gesichtsfelde eine Scheindrehung nach rechts herum, wie der Zeiger einer Uhr.

Für die Bewegungen aus der Primärstellung in schräger Richtung auf- oder abwärts muss eine Componente nach der Axe *UO* mit einer verticalen Componente verbunden werden. Um nach innen und oben zu drehen, brauchen wir also den *R. internus*, der nach innen dreht um die verticale Axe, zugleich mit dem *R. superior* und *Obl. inferior*, die vereinigt nach oben drehen um die Axe *UO*.

Mittels des Schemas in der *Fig. 158* lassen sich diese Combinationen leicht übersehen, sonst sind für die bequemere Uebersicht derselben drehbare Modelle des Auges construirt, Ophthalmotrope, deren Beschreibung unten folgen wird.

Abgesehen von den bisher besprochenen Beschränkungen der Bewegung jedes einzelnen Auges, sind nun auch die Bewegungen unserer beiden Augen in gewisser Weise sowohl von einander abhängig, als auch die Accommodation von der Augenstellung abhängig ist. Unter den gewöhnlichen Verhältnissen des normalen Sehens richten wir immer beide Blicklinien auf einen im Raume vor uns liegenden reellen Punkt, welcher nah oder weit entfernt sein kann. In diesem Punkte, dem Blickpunkte, schneiden sich beide Blicklinien. Trotzdem jedes Auge einen ganz selbständigen Muskelmechanismus hat,

und also die Möglichkeit besitzt, jede Art der Bewegung ganz unabhängig von dem andern Auge auszuführen, so haben wir doch nur gelernt diejenigen Bewegungen wirklich auszuführen, welche nöthig sind, um einen reellen Punkt deutlich und einfach mit beiden Augen zu sehen. So können also beide Augen gleichzeitig gehoben werden, um einen hoch gelegenen Blickpunkt zu fixiren; sie können auch beide gleichzeitig gesenkt werden, um ein tief gelegenes Object anzublicken. Wir sind aber ohne weitere Hilfsmittel nicht im Stande, willkührlich das eine nach oben, das andere nach unten zu richten, wobei sich die Blicklinien in keinem reellen Blickpunkt schneiden würden.

Wir können ferner beide Blicklinien nach rechts oder beide nach links wenden, um beziehlich einen rechts oder links gelegenen Gegenstand zu betrachten. Wir können sie auch convergent machen, indem wir die rechte nach links, die linke nach rechts wenden, wenn wir einen nahen Fixationspunkt wählen. Aber Jemand, der sich nicht schon besonders darauf eingeübt hat, kann die Blicklinien nicht divergent machen, indem er die rechte nach rechts, die linke nach links wendet.

Endlich folgt auch bei normalen Augen die Accommodation immer der Entfernung desjenigen Gegenstandes, auf welchen die Blicklinien convergiren. Bei parallelen Blicklinien sind die Augen für unendliche Ferne eingerichtet, bei convergirenden für die Nähe, und sind desto stärker accommodirt, je stärker die Convergenz ist. Kurzsichtige Augen sind dagegen für ihren Fernpunkt accommodirt, so lange die Blicklinien auf ihn oder auf einen noch entfernteren Punkt convergiren. Für nähere Blickpunkte folgt die Accommodation der Convergenz. Sehr kurzsichtige Augen können aber ohne Brille oft gar nicht mehr binocular fixiren und accommodiren.

Obgleich nun der Zwang beide Augen übereinstimmend zu bewegen, und auch die Accommodation damit in Uebereinstimmung zu bringen beim normalen Sehen so unausweichlich erscheint, dass ältere Physiologen diese Bewegungen in die Klasse der unwillkührlich eintretenden Mitbewegungen rechneten, so lässt sich doch zeigen, dass die Gesetzmässigkeit dieser Verbindungen nur auf Einübung beruht. Man muss dabei im Allgemeinen beachten, dass die Intention unseres Willens bei allen willkührlichen Bewegungen sich immer nur auf die Erreichung eines direct und deutlich wahrnehmbaren äusseren Erfolges bezieht. Bei den Bewegungen unserer Extremitäten können wir allerdings durch den Gesichtssinn die Stellung wahrnehmen, in welche das Glied durch eine gewisse Willensaction versetzt wird, und deshalb ist für sie und für alle durch das Gesicht und Getast wahrnehmbaren Theile des Körpers die Stellung des zu bewegenden Theils der nächste bewusste Zweck der darauf gerichteten Willensactionen. Bei allen nicht sichtbaren und nicht fühlbaren Theilen des Körpers ist es aber nicht die Stellung und Bewegung, sondern erst der durch diese zu erreichende Erfolg, den wir durch eine willkührliche Action zu erreichen wissen. So gebrauchen wir unseren Kehlkopf und die Theile unseres Mundes mit einer bewundernswürdigen Sicherheit und Geschicklichkeit, um die zartesten Veränderungen der Tonhöhe und Klangfarbe unserer Gesangs- und Sprachlaute hervorzubringen, und doch weiss der Laie gar nicht, und der Physiologe unvollkommen genug,

was für Bewegungen wir eigentlich dabei ausführen. Hier bezieht sich also die Willensintention nur auf den hervorzubringenden Ton, nicht auf die Bewegung der einzelnen Theile des Kehlkopfs, und wir haben gelernt alle diejenigen Bewegungen des Kehlkopfs auszuführen, die für einen solchen Zweck nöthig sind, aber keine anderen.

Aehnlich ist es mit den Augen; wir können ihre Bewegungen nicht selbst sehen, ausser wenn wir vor einem Spiegel stehen; wir können sie auch nur sehr unvollkommen fühlen. Aber wir nehmen sehr deutlich wahr die Verschiebung der optischen Bilder auf der Netzhaut, oder vielmehr das entsprechende Wandern des Blickpunktes im Gesichtsfelde, wenn wir Bewegungen mit den Augen machen. Dies ist also auch die Wirkung, auf die unsere Willensintention gerichtet ist, und welche wir willkührlich zu erreichen wissen. Wenn wir wünschen, dass Jemand, der noch nicht über seine Augenbewegungen zu reflectiren gelernt hat, die Augen nach rechts wenden soll, so müssen wir ihm nicht sagen: „Wende dein Auge nach rechts“, sondern „Sieh jenen rechts gelegenen Gegenstand an“. Und selbst der Geübte beherrscht seine Augenbewegungen sicherer, wenn er entsprechende Gegenstände zur Fixation wählt, als wenn er eine bestimmte Stellung der Augen ohne solche Fixation einhalten will. Ich kenne einen ausgezeichneten und in der Optik höchst erfahrenen und geübten Physiker, dem es unmöglich ist, seine Gesichtslinien parallel zu stellen, wenn er nicht sehr ferne Objecte vor sich hat, oder Doppelbilder aus einander zu treiben, wenn er nicht ein passendes Fixationsobject dazu hat, und auch dann sie schwer auseinanderhält, sobald er auf sie zu achten anfängt. Ich führe dies Beispiel an, weil es zeigt, welches der Zustand des natürlichen Auges ist, mit dem noch keine physiologischen Experimente angestellt sind, und welches noch nicht gelernt hat, über seine Stellungen zu reflectiren, trotzdem daneben vollständige Einsicht in die Theorie des Sehens vorhanden ist.

Unsere Willensintention beim Gebrauche der Augen ist also darauf gerichtet nach einander einzelne Punkte des Gesichtsfeldes möglichst deutlich mit beiden Augen zu sehen; dies wird erreicht, wenn wir das betreffende Object in beiden Augen auf dem Centrum der Netzhautgrube abbilden, und wir haben dem entsprechend gelernt unsere beiden Augen so zu stellen und so zu accommodiren, dass dies geschieht. Andere Bewegungen mit den Augen auszuführen, welchen kein solcher Zweck des möglichst deutlichen Sehens zu Grunde liegt, auf den unser Willen sich richten könnte, haben wir nicht gelernt.

Es scheint mir damit zusammenzuhängen, dass wir leichter parallele, ja selbst divergente Stellungen der Blicklinien hervorbringen beim Sehen nach oben, wo sich der Horizont und der Himmel darzubieten pflegt, convergente leichter beim Sehen nach unten, wo der Fussboden und die Objecte, welche man in den Händen hält, zu betrachten sind.

Indem man aber nun die Art der Willensanstrengung kennen lernt, welche für Erreichung der verschiedenen Augenstellungen als solcher dient, kann Jemand, der viel physiologisch-optische Versuche anstellt, allmählig auch lernen, zunächst solche normale Augenstellungen hervorzubringen, für welche zur Zeit

kein Fixationsobject vorhanden ist, indem man gleichsam nach einem imaginären Fixationsobjecte blickt. Wenn man sich also zum Beispiel nahe vor dem Nasenrücken ein solches Object vorstellt, oder gleichsam nachsucht, ob keines dort vorhanden sei, kann man so starke Convergenz hervorbringen, dass die Augen wie die eines Schielenden aussehen. Und umgekehrt kann man nahe Gegenstände mit parallelen Gesichtslinien betrachten, wenn man durch sie hin in die Ferne zu sehen sucht, oder wenn man, wie das Volk sagt, nach ihnen hingewendet „in das Blaue stiert", das heisst die Art von Blick annimmt, welche einzutreten pflegt, wenn man in Gedanken versunken gar nicht auf die Gegenstände achtet, die man vor sich hat, wobei denn die Accommodationsanstrengung nachlässt, ebenso die entsprechende Convergenzstellung, und die Augen ihre Fernstellung annehmen.

Geht man von Convergenzstellungen zur parallelen Stellung der Blicklinien über, ohne ein bestimmtes einzelnes Object zu fixiren, und übertreibt man die zu diesem Uebergange nöthige Anstrengung, so bringt man auch schwache Divergenzstellungen heraus.

Die Fähigkeit jeder Zeit, und ohne entsprechendes Object Convergenzstellungen und Parallelstellungen der Blicklinien hervorbringen zu können, ist für Jeden, der sich mit physiologisch-optischen Untersuchungen beschäftigen will, von grosser Wichtigkeit, und muss geübt werden.

Dann aber kann man nun auch, freilich zunächst nur in geringerem Grade, diejenigen Combinationen von Augenstellungen hervorbringen, welche beim gewöhnlichen Sehen nicht vorkommen. Um es zu thun, braucht man nur die Augen unter solche Bedingungen zu versetzen, dass nur durch Abweichung von den normalen Stellungen einfache und deutliche Bilder herzustellen sind.

Was zunächst die Verbindung zwischen Convergenz und Accommodation betrifft, so wird diese sogleich verändert, wenn man eine Brille aufsetzt. Normalsichtige Augen zum Beispiel, welche eine Brille mit schwachen Concavgläsern vorsetzen, sind gezwungen, um entfernte Gegenstände deutlich zu sehen, bei parallel gerichteten Blicklinien doch für die Nähe zu accommodiren. Ist die Brille nicht zu stark, so ist es auch sogleich möglich, die Augen dieser neuen Aufgabe anzupassen, obgleich die Augen dabei das Gefühl ungewöhnlicher Anstrengung haben und bald ermüden. Daher denn überhaupt der Gebrauch einer Brille in der ersten Zeit, wo man sie zu tragen beginnt, immer mit einer merklichen Anstrengung verbunden ist, und umgekehrt Leute, die lange Zeit eine Brille getragen haben, wenn sie sie abnehmen, einen angestrengten und gleichsam scheuen Blick zeigen, selbst für solche Gegenstände, für welche sie accommodiren können. Es ist dies eine allgemeine Erfahrung, dass wir gut eingeübte Gruppenbewegungen mit viel geringerer Anstrengung ausführen, als ungeübte. Man denke daran, welche Anstrengung ein ungeübter Schwimmer oder ein ungeübter Schlittschuhläufer aufwenden, um fort zu kommen, und wie leicht dasselbe nachher geht, wenn sie sich geübt haben. Gerade dasselbe geschieht bei den Augen, wenn wir ihre Bewegungen in ungewöhnlicher Weise combiniren sollen.

Eine veränderte Verbindung von Convergenz und Accommodation kann

man auch erreichen, wenn man stereoskopische Bilder betrachtet und deren Entfernung von einander willkührlich verändert. Davon werden wir unten ausführlicher handeln.

Divergenz der Augen lässt sich ebenfalls bei der Betrachtung stereoskopischer Bilder erzielen, wenn man sie immer weiter von einander entfernt und dabei ihre Vereinigung zu einem Bilde zu erhalten sucht. Ich kann auf diese Weise eine Divergenz meiner Blicklinien bis zu 8 Grad hervorbringen. Dasselbe lässt sich auch erreichen, wenn man zwei gleiche schwach brechende Glasprismen von 6 bis 8 Grad brechendem Winkel so vor beide Augen nimmt, dass die brechenden Winkel (die dünnsten Stellen der Prismen) nach unten sehen, und durch sie nach entfernten Gegenständen blickt. Dazu braucht man bei der angegebenen Haltung der Prismen parallele Gesichtslinien, die aber etwas mehr nach unten gerichtet sind, als ohne die Prismen. Wenn man nun die Prismen langsam dreht, so dass ihre brechenden Winkel sich beide nach aussen zu wenden anfangen, so kann man doch noch die vorher gesehenen Gegenstände fortfahren zu fixiren und einfach zu sehen. Man muss dazu aber jetzt die Augen divergent stellen. Man kann dasselbe auch mit einem Prisma erreichen, wenn man dasselbe mit dem brechenden Winkel nach aussen vor ein Auge hält, und zuerst nahe Gegenstände betrachtet, welche unter diesen Umständen noch convergente oder parallele Blicklinien erfordern, und dann allmälig zu entfernteren Objecten übergeht, welche Divergenz verlangen.

Endlich haben sowohl Donders als ich selbst beobachtet, dass man verschiedene Erhebung beider Augen erzielen kann, wenn man ein schwach brechendes Prisma vor ein Auge nimmt, und den brechenden Winkel zuerst nach innen richtet. Blickt man so nach entfernten Gegenständen, so muss man die Gesichtslinien etwas convergent stellen, was ohne Schwierigkeit zu erreichen ist. Jetzt drehe man das Prisma ganz langsam so, dass der brechende Winkel allmälig immer weiter nach unten rückt, und suche die Fixation des Objects zu erhalten. Es gelingt dies nach einiger Uebung. In diesem Falle sieht das freie Auge den Gegenstand direct mit gerade auf ihn hingerichteter Blicklinie; das vom Prisma bedeckte Auge dagegen muss sich merklich nach unten wenden, um den Gegenstand zu fixiren. Hat man eine solche Stellung der Augen erreicht, so nehme man das Prisma plötzlich fort, man sieht dann das fixirte Object in unter einander stehenden Doppelbildern zum Zeichen, dass die beiden Blicklinien nicht gleich hoch gerichtet sind. Auch in der Richtung von oben nach unten bringe ich Abweichungen von 6^{0} ohne Schwierigkeit zu Stande.

Aus diesen Thatsachen geht hervor, dass die Verbindung, welche zwischen den Bewegungen beider Augen besteht, nicht durch einen anatomischen Mechanismus erzwungen, sondern vielmehr durch den blossen Einfluss unseres Willens veränderlich ist, und dass wir nur in der Bildung unserer Willensintentionen beschränkt sind, insofern diese nur auf den Zweck einfach und deutlich zu sehen gerichtet sein können.

Ich habe schon früher auf andere Erfahrungen aufmerksam gemacht, die dasselbe beweisen, und mir auch von andern Beobachtern bestätigt worden sind. Wären die Augenbewegungen mittels eines anatomisch vorgebildeten

Mechanismus coordinirt, so wäre zu erwarten, dass dieser desto widerstandsloser wirken würde im Zustande der Schläfrigkeit, wo die Energie des Willens gebrochen ist. Ich beobachte indessen regelmässig, dass wenn ich Abends beim Lesen schläfrig werde, oder nach einem langen Diner aus Rücksicht auf die Gesellschaft meine Augen offen zu halten strebe, ich Doppelbilder der vor mir liegenden Objecte sehe, welche bald nur zu grosse Divergenz, bald verschiedene Höhe, bald abnorme Raddrehungen der Augen anzeigen. So wie ich durch dergleichen ungewöhnliche Doppelbilder aufmerksam gemacht mich ermuntere, gehen die Doppelbilder meist schnell wieder zusammen, und wenn ich sie dann willkührlich auseinander zu treiben suche, kommen nur die gewöhnlichen neben einander stehenden Doppelbilder zu Stande, die von zu grosser oder zu geringer Convergenz für das Object herrühren [1].

Dieselbe Art von Zwang nun, welche die Bewegungen beider Augen mit einander und mit der beiderseitigen Accommodation verbindet, besteht auch betreffs der Raddrehung, die zu einer bestimmten Lage des Gesichtspunktes gehört, und es war von vorn herein zu vermuthen, dass auch die Raddrehung nur deshalb unserm Willen entzogen sei, weil wir durch eine etwaige Veränderung derselben keinen bestimmten praktischen und wahrnehmbaren Erfolg erzielen können. Es ist mir jetzt gelungen, die Richtigkeit dieser Annahme direct zu erweisen. Man kann nämlich auch die Raddrehung der Augen ganz erheblich verändern, wenn man dieselben unter Umstände bringt, wo sie nur bei veränderter Raddrehung einfach sehen können.

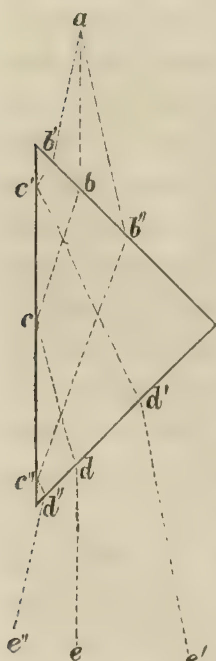


Fig. 159.

Zu dem Ende benutze ich zwei gleichschenkelige und rechtwinkelige Glasprismen. Wenn man durch ein solches Prisma parallel der Hypotenusenfläche hindurchsieht, wie *Fig. 159* anzeigt, so wird der Lichtstrahl ab, wo er durch die Cathetenfläche des Prisma in dieses eintritt, gebrochen und gegen die Hypotenusenfläche hin abgelenkt, von dieser bei c unter gleichem Winkel reflectirt, und tritt dann bei d wieder aus dem Prisma aus. Wenn b und d gleich weit von der Hypotenusenfläche entfernt sind, so geht der Strahl ab nach dem Austritt aus dem Prisma in derselben Richtung fort, in der er eingetreten ist. Strahlen dagegen, welche wie ab' und ab'' nicht parallel der Hypotenusenfläche auffallen, und nach der Brechung von dieser (bei c' und c'') reflectirt werden, treten nachher aus dem Prisma so aus, dass der eintretende und austretende Strahl ab' und $d'e'$, oder ab'' und $d''e''$ gleiche Winkel mit der Hypotenusenfläche bilden. Ein solches Prisma wirkt also unter diesen Umständen wie ein Spiegel, aber mit dem Vortheile, dass die Richtung, in der der mittlere Theil des

[1] Herr E. Hering hat in seinen Beiträgen zur Physiologie, 4. Heft, S. 274, die Richtigkeit dieser Beobachtung bezweifelt. Er hat offenbar die Erscheinung, auf die es ankommt, nicht gesehen. Die zuletzt oben angeführte Beobachtung beweist, dass ich nicht in den Irrthum verfallen bin, den er mir zuschreibt, und der von Jemandem, welcher auch nur ein wenig Uebung in der Beobachtung von Doppelbildern hat, auch schwerlich begangen werden konnte, dass ich nämlich wegen schiefer Kopfhaltung neben einander stehende Bilder für über einander stehend gehalten hätte.

Spiegelbildes erscheint, unverändert bleibt. Indem der Beobachter in der Richtung *ab* durch das Prisma hindurchsieht, erblickt er die jenseits liegenden Gegenstände, aber so, dass Rechts in Links verkehrt ist, wenn die Hypotenusenfläche des Prisma senkrecht steht, oder Oben in Unten, wenn sie horizontal liegt.

Wenn man nun den vom ersten Prisma reflectirten Strahl *de* in derselben Weise durch ein zweites Prisma gehen lässt, und die Hypotenusenflächen beider parallel liegen, so wird die Umkehrung der Bilder, welche das erste Prisma erzeugt hatte, durch das zweite, was noch ein Mal in derselben Weise umkehrt, wieder aufgehoben. Alle Gegenstände erscheinen durch zwei solche Prismen gesehen in ganz unveränderter Lage und Stellung. Macht man aber die Hypotenusenflächen der beiden Prismen nicht ganz parallel, sondern dreht das eine Prisma ein wenig um eine dem Strahl *ae* parallele Axe, wie in nebenstehender *Fig. 160*, so wird die Umkehrung, welche das erste Prisma hervorbrachte, durch das zweite nicht vollständig wieder aufgehoben, sondern es bleibt eine kleine Drehung der gesehenen Gegenstände um den ungebrochenen Strahl *ae* als Axe zurück, welche doppelt so gross erscheint, als die wirkliche Drehung des einen Prisma gegen das andere ist. Uebrigens können beide Prismen zusammen genommen, wenn sie nur gegen einander festgestellt sind, beliebig um ihren gemeinsamen Axenstrahl gedreht werden, ohne dass die scheinbare Lage der dadurch gesehenen Gegenstände eine Veränderung erlitte.

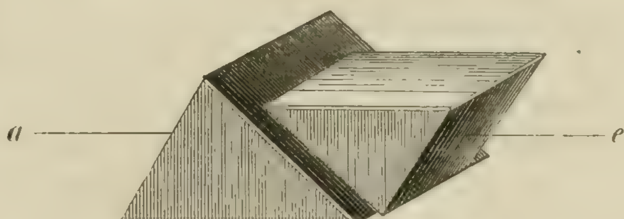


Fig. 160.

Wenn man nun eine solche Combination zweier Prismen, welche eine scheinbare Raddrehung der Objecte um die Gesichtslinie von etwa 5 Grad hervorbringt, vor ein Auge nimmt und mit beiden Augen gleichzeitig entferntere Objecte betrachtet, die eine grosse Mannigfaltigkeit verschiedener deutlich abstehender Theile zeigen, so sieht man anfangs, wie zu erwarten ist, gekreuzte Doppelbilder [1] der Objecte, die sehr auffallend und leicht zu bemerken sind. Wenn man aber fortfährt, die Objecte zu betrachten, und dabei den Blick vielfach über die einzelnen ausgezeichneten Punkte derselben herumwandern lässt, welche man alle nach einander einfach sehen kann, so schwinden die Doppelbilder endlich, und man sieht vollständig einfache Bilder gerade so gut, wie beim gewöhnlichen Sehen. Wenn man nun einige Minuten lang in dieser Weise einfach gesehen hat, dann das Prismensystem fortnimmt und mit freien Augen dieselben Objecte betrachtet, so erblickt man jetzt im ersten Moment gekreuzte Doppelbilder, die sich aber schnell wieder vereinigen.

Den Verdacht, dass bei diesem Versuche die Doppelbilder nicht vereinigt, sondern nur übersehen werden, kann man erstlich dadurch beseitigen, dass man in einiger Entfernung vor die betrachteten Objecte ein senkrechtes Stäbchen hält, welches in Doppelbildern erscheint. Diese haben dann nur die gewöhn-

[1] Ich verstehe hier unter gekreuzten Doppelbildern solche, die eine Raddrehung gegen einander erlitten haben.

liche schwache Neigung zu einander, die Neigung der scheinbar verticalen Meridiane. Daraus folgt also, dass die horizontalen Netzhautmeridiane hinter den Prismen so eingestellt werden, dass sie entsprechende gleiche Bilder empfangen.

Ferner habe ich auch zur Controlle, während ich durch die Prismen sah, Nachbilder eines horizontalen Streifens in beiden Augen entwickelt, und diese, nachdem ich die Prismen entfernt hatte, auf eine weisse Fläche geworfen. Im ersten Augenblicke erschienen dann die Nachbilder beider Augen verschieden geneigt gegen ein und dieselbe objective Linie des Gesichtsfeldes. Sobald aber die Augen in ihre natürliche Stellung zurückgegangen waren, erschienen beide Nachbilder in gleicher Lage im Gesichtsfelde. War die objective Linie, von der die Nachbilder genommen wurden, horizontal, und das rechte Auge mit einem Doppelprisma bewaffnet, welches 5^{0} nach links drehte, so erschienen die Nachbilder beider Auges, nachdem die Prismen entfernt und beide Augen in ihre normale Stellung übergegangen waren, etwas nach links gedreht, woraus folgte, dass beim Sehen durch das Prisma das linke Auge etwas nach rechts gedreht gewesen war, während das rechte Auge der scheinbaren Drehung des Gesichtsfelds folgend nach links gedreht war. Die Nachbilder beider Augen aber zeigten sich hierbei auf correspondirenden Stellen entwickelt, und daraus folgt, dass auch correspondirende Stellen beider Netzhäute das Urbild aufgenommen hatten. Aus diesen Versuchen folgt also, dass auch die Raddrehungen des Auges unter besonderen Umständen verändert werden können, wenn nämlich abnorme Drehungen dieser Art gebraucht werden, um die Objecte eines ausgedehnten und an Einzelheiten reichen Gesichtsfeldes in ungekreuzten Doppelbildern zu sehen. Die äusserste Drehung des Gesichtsfeldes, welcher ich bei diesen Versuchen mit den Augen folgen konnte, betrug 7 Grad. Dabei sind nun wahrscheinlich beide Augen um gleich viel, aber in entgegengesetztem Sinne gedreht worden, jedes also etwa um $3\frac{1}{2}$ Grad. Die abweichende Stellung der Augen wird dabei nicht unmittelbar durch den blossen Anblick der Divergenz der Doppelbilder hervorgebracht, sondern erst durch eine Reihe correspondirender Bewegungen beider Augen, indem diese das Gesichtsfeld nach allen Richtungen durchlaufen, so dass sie fortdauernd die Einheit des Fixationspunktes erhalten.

Diese Erfahrungen an den Augenmuskeln sind von grosser Wichtigkeit für die Lehre von der Willkührlichkeit der Bewegungen überhaupt. Gewöhnlich stellt man sich vor, dass die Fähigkeit, eine bestimmte willkührliche Bewegung auszuführen, gleich von vorn herein durch die Natur gegeben sei, und nicht weiter gelernt zu werden brauche, ausser etwa in den Fällen, wo wie beim Gehen, Stelzenlaufen, Schlittschuhlaufen, Schwimmen ein gewisses künstliches Gleichgewicht bei der Bewegung zu erhalten oder die Wirkung anderer Naturkräfte dabei mit zu beachten sei. Es müssen aber auch für andere Bewegungen die dazu nöthigen Willensintentionen erst gelernt werden. Selbst unter den Bewegungen der am freiesten gebrauchten Glieder unseres Körpers, wie zum Beispiel der oberen Extremitäten findet man leicht Fälle der Art, welche erst eine besondere Einübung erfordern, ehe man sie ausführen kann.

So kann man zum Beispiel den horizontal ausgestreckten Arm im Schultergelenk um seine Längsaxe rollen, ebenso Radius und Hand um die Ulna. Beide Rollungen werden durch Muskelgruppen ausgeführt, die ganz unabhängig von einander sind. Wir sind aber nur geübt beide Rollungen in gleichem Sinne auszuführen, weil unsere Absicht unter gewöhnlichen Umständen nur dahin geht, die Hand in die eine oder andere Rotationsstellung zu bringen. Nun kann man die Aufgabe stellen, beide Rollungen in entgegengesetztem Sinne zu machen, so dass der Ellbogen sich dreht, die Hand aber stehen bleibt. Es ist dies eine Art der Bewegung, die keinerlei praktischen Zweck hat, und deshalb gewöhnlich niemals ausgeführt wird Auch habe ich bisher noch Niemand gefunden, der dies auf die erste Aufforderung hätte thun können. Und doch ist diese Bewegung ebenso gut zu lernen, wie die abnormen Augenbewegungen. Man braucht nur mit der Hand einen festen Gegenstand zu fassen, und den Ellenbogen zu drehen, dann den Griff der Hand allmählig zu lockern, und dieselbe Bewegung zu machen, bis man die Hand ganz frei lassen kann. Bei diesem Beispiele finden wir also eine ganz ähnliche Beschränkung der Willkührlichkeit in der Combination der Bewegungen, welche anfangs unüberwindlich scheint, und doch durch zweckmässig geleitete Einübung überwunden werden kann.

Wir haben jetzt zu untersuchen, welche Ursachen bei der Einübung der Augenbewegungen darauf hinwirken können, dass nur gewisse bestimmte Raddrehungen mit den verschiedenen Richtungen beider Gesichtslinien verbunden werden.

Was zuerst das Gesetz von Donders betrifft, wonach der Raddrehungswinkel nur abhängt von der zeitweiligen Richtung beider Gesichtslinien, so ist leicht einzusehen, dass die Einhaltung dieses Gesetzes eine wesentliche Erleichterung und Sicherung für die Lösung der Aufgabe gewähren muss, trotz der Augenbewegungen und trotz der Verschiebungen der Netzhautbilder auf der Netzhaut ruhende Objecte als ruhend anzuerkennen. Wir lassen unseren Blick fortdauernd im Gesichtsfelde wandern, weil wir nur so nach einander alle einzelnen Theile des Gesichtsfeldes möglichst deutlich sehen können. Dass wir sie mit beiden Augen möglichst deutlich sehen, wird zunächst dadurch erreicht, dass wir beide Gesichtslinien auf den zeitweilig betrachteten Punkt hinrichten und die Augen für ihn accommodiren. Dabei könnten die beiden Augen noch in beliebiger Weise um die Blicklinie als Axe gedreht werden, ohne dass wir aufhören würden mit beiden Augen den betreffenden Punkt zu fixiren. Wenn wir nun in dieser Weise ein mit ruhenden Objecten angefülltes Gesichtsfeld vor uns haben, so wechseln mit der Wanderung des Blicks auch fortdauernd die Empfindungen in den einzelnen Nervenfasern der Netzhaut. Wenn wir zur Betrachtung eines schon früher fixirten Objectes *A* zurückkehren, und nun eine andere Raddrehung der Augen brauchen wollten, als das erste Mal, so würde zwar der Eindruck des fixirten Punktes auf die beiden Netzhautgruben derselbe sein wie früher, aber die Netzhautbilder der Nachbarschaft würden eine andere Lage auf der Netzhaut haben, die rings um die Netzhautgrube liegenden Nervenfasern würden ganz andere Lichteindrücke erhalten, als das erste Mal; und um zu constatiren, dass das Object trotz dieses veränderten Systems von Empfindungen doch das-

selbe geblieben ist, müssten wir das Auge ganz in die alte Stellung auch in Bezug auf die Raddrehung zurückführen, um zu prüfen, ob dann bei Herstellung der früheren Stellung auch der alte Eindruck wieder erhalten werde.

Da nun für das Erkennen der Objecte in der Regel beim natürlichen Sehen dadurch nichts gewonnen wird, dass wir sie mit veränderten Raddrehungen ansehen, und nur die Rückkehr in eine unverändert bleibende bestimmte Stellung nöthig ist, um das ruhende Object als ruhend wiederzuerkennen, so werden wir von Anfang an uns gewöhnen müssen für bestimmte Richtungen der Gesichtslinien auch immer wieder bestimmte Grade der Raddrehung zu gebrauchen.

Bei hinreichender Einübung auf die Kenntniss der Veränderungen, welche die Empfindungen der Netzhaut bei Drehung des Auges um die Blicklinie erleiden, würde es zweifelsohne auch möglich werden, die unveränderte Lage der Objecte trotz des veränderten Netzhautbildes richtig zu beurtheilen. Aber es würde dies eine neue und grosse Complication in der Einübung unseres Auges für die Gesichtswahrnehmungen sein, welche gar keinen Vortheil bringen würde, und der wir deshalb von vorn herein aus dem Wege gehen [1].

Durch dieses Princip, welches ich das Princip der leichtesten Orientirung für die Ruhestellungen des Auges genannt habe, wird zunächst verlangt, dass jeder bestimmten Richtung beider Gesichtslinien bestimmte Werthe der Raddrehung beider Augen zugehören, aber es wird noch nicht bestimmt, welche Werthe zu nehmen seien.

Bisher haben wir nur den Fall untersucht, wo dasselbe Object zwei Mal nach einander direct angeblickt wurde; nun ist noch zu fordern, dass ein ruhendes Object als ruhend erkannt werde, wenn es einmal direct und dann indirect betrachtet wird.

Wir wollen die Untersuchung zunächst für ein einziges, isolirt gedachtes, Auge führen, und später zusehen, welche Veränderungen bei der Verbindung mit einem zweiten Auge einzutreten haben. Wir beschränken uns ferner auf die Annahme unendlich kleiner Verschiebungen des Auges; denn wenn die Anerkennung der Ruhe des Objects erhalten bleibt während der unendlich kleinen Verschiebungen, die während der unendlich kleinen Zeittheilchen einer ausgedehnteren Bewegung stattfinden, so ist diese Anerkennung auch am Ende der Bewegung erhalten.

Wir wollen eine Anzahl von Netzhautpunkten mit a, b, c, d u. s. w. bezeichnen, und es möge a das Centrum der Netzhautgrube sein. Die Punkte des Bildes, welche auf diese Netzhautpunkte fallen, bezeichnen wir mit A, B, C, D. Der Punkt A des Bildes ist also fixirt; der Punkt B sei von A, also auch b von a nur um eine verschwindend kleine Grösse entfernt. Jetzt gehe der

---

[1] Ich habe früher (Archiv für Ophthalmologie, IX, 2, 156—157) noch hinzugefügt, dass auch die Lage der Objecte im Raume richtig beurtheilt werden sollte. Dagegen hat Herr E. Hering den Einwand gemacht, dass die Beurtheilung der Lage durch die Raddrehungen der Augen überhaupt gestört werde. In gewissen, aber freilich viel beschränkteren Fällen, als Herr Hering meint, ist das richtig, wie der nächste Abschnitt lehren wird, und deshalb habe ich die Orientirung über die wirkliche Lage der Objecte in der oben gegebenen Ableitung aus dem Spiele gelassen, und mich auf das Wesentliche beschränkt, dass ruhende Objecte als ruhend anerkannt werden.

Blick vom Punkte A des Bildes über auf den Punkt B, so dass jetzt B auf dem Centrum a der Netzhaut abgebildet sei. Dabei werden die Punkte A, C, D u. s. w. des Bildes auf andere Netzhautpunkte fallen, die wir mit α, γ, δ u. s. w. bezeichnen wollen. Während also die frühere Empfindung des Punktes b übergeht auf a, geht die Empfindung, welche a hatte, über auf α, die von c auf γ, die von d auf δ u. s. w. Wenn nun dasselbe System von Empfindungsänderungen immer wieder eintritt, so oft wir die Empfindung, welche b hatte, durch einen Willensimpuls, der Bewegung zur Folge hat, übergehen lassen auf a, so werden wir lernen diesen Inbegriff von Aenderungen als sinnlichen Ausdruck einer Augenbewegung zu betrachten, dem keine Aenderung in den Objecten entspricht. Die Probe dafür wird sein, dass wir wiederum in jedem beliebigen Zeitmomente A fixiren können, und dann das erste System von Empfindungen unverändert wiederfinden. Es kommt aber eben darauf an, dass wir, auch ohne diese Probe anzustellen, während wir B fixiren, lernen, dass die beobachtete Aenderung keine Aenderung der Objecte ist.

Damit nun jedes Mal, wenn die Fixation übergeht auf den dem Netzhautpunkte b correspondirenden Punkt des Gesichtsfeldes, auch gleichzeitig α das bisherige Bild von a, γ das von c, δ das von d u. s. w. empfange, ist es nöthig, dass das Auge diese Bewegung immer durch Drehung um eine und dieselbe, in Beziehung zum Augapfel festgelegene Axe ausführe, welche wir mit $\mathfrak{B}$ bezeichnen wollen.

Nun ist b nur einer der dem Punkte a benachbarten Netzhautpunkte; es möge c ein anderer von a unendlich wenig entfernter und in anderer Richtung als b gelegener Punkt sein, so wird eine zweite im Augapfel festgelegene Drehungsaxe $\mathfrak{C}$ existiren müssen, um den Blick in der Richtung ac zu verschieben, wenn diese Verschiebung immer mit der gleichen Verschiebung des Netzhautbildes auf der Netzhaut, also mit demselben Systeme von Empfindungsänderungen begleitet sein soll.

Jeden anderen Punkt F des Gesichtsfeldes in der Nähe des Fixationspunktes A werden wir mit dem Blicke alsdann erreichen können durch eine Drehung von gewisser sehr kleiner Grösse um die Axe $\mathfrak{B}$ und durch eine zweite Drehung von gewisser sehr kleiner Grösse um die Axe $\mathfrak{C}$. Da man nun bekanntlich bei unendlich kleinen Drehungen die Drehungsaxen nach dem Principe des Kräfteparallelogramms zusammensetzen kann, und die Diagonale der Axen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{C}$ immer in der durch $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{C}$ gelegten Ebene liegen muss, so folgt, dass das Auge sich beim Blicke nach F in dieselbe Stellung bringen lässt bei einer einfachen Drehung um eine einzige in der Ebene $\mathfrak{B}\mathfrak{C}$ gelegene Drehungsaxe, wie bei der Drehung erst um $\mathfrak{B}$, dann um $\mathfrak{C}$. Und da es bei der Richtung des Blickes nach F nach dem Gesetze von Donders, welches wir eben zu begründen versucht haben, immer dieselbe Richtung haben muss, auf welchem Wege es auch dahin geführt sein mag, so folgt, dass der Uebergang des Blickes von A nach F oder irgend einem andern von A unendlich wenig entfernten Punkte auszuführen ist durch Drehung des Augapfels um eine Drehungsaxe, die immer in ein und derselben, relativ zum Augapfel fest liegenden Ebene $\mathfrak{B}\mathfrak{C}$ gelegen ist. Dies würde die Bedingung dafür sein, dass jede unendlich kleine Verschiebung des Blicks in allen Fällen, wo sie eintritt,

immer von einem constanten Systeme von Aenderungen der Empfindung in den Sehnervenfasern begleitet ist, welches schliesslich als der sinnliche Ausdruck der zu jener Verschiebung des Blicks gehörigen Augenbewegung kennen gelernt wird [1].

Dass die Drehungsaxen für irgend welche sehr kleine Verschiebungen des Auges, die von einer bestimmten festen Stellung ausgehen, alle in einer und derselben Ebene liegen müssen, folgt, wie die unten folgende mathematische Behandlung zeigen wird, unmittelbar für alle Theile des Blickfeldes, wenn die Raddrehung eine continuirliche, nicht sprungweise sich ändernde Function der Richtung der Blicklinie ist. Das Princip der leichtesten Orientirung fordert, dass diese Ebene, wo möglich, relativ zum Augapfel fest sein müsse.

Es wird also am leichtesten sein, die Veränderungen der Empfindung bei der Bewegung des Augapfels als Ausdruck einer solchen Bewegung und nicht einer Bewegung der Objecte zu erkennen, wenn der Uebergang des Blicks auf den dem Netzhautpunkte *b* entsprechenden Punkt des Gesichtsfeldes immer mit derselben Verrückung des Netzhautbildes auf der Netzhaut begleitet ist, unabhängig davon, welche Anfangslage der Augapfel hat. Es würde eine viel complicirtere Einübung in dem Gebrauche des Auges verlangen, wenn die Objecte immer als ruhend erkannt werden sollten, trotzdem die genannte Verschiebung des Netzhautbildes beim Ausgange von verschiedenen Ausgangspunkten sich als verschieden erweisen sollte. Für unmöglich freilich würden wir eine Einübung der Art nicht von vorn herein erklären können. Die Erfahrung lehrt aber, wie wir sehen werden, dass sie nicht besteht.

Die hier aufgestellte Bedingung für die leichteste Orientirung beim indirecten Sehen ist nämlich vom menschlichen Auge nicht vollständig erfüllt und kann auch, wie die nachfolgende analytische Behandlung des Problems zeigen wird, nicht vollständig erfüllt werden, ausgenommen für ein Feld, dessen Ausdehnungen gegen den Radius der Kugel verschwindend klein sind. Es ist schon oben angeführt worden, dass nach dem Listing'schen Gesetze die Ebenen der Drehungsaxen bei verschiedenen Stellungen der Blicklinie auch verschiedene Lagen im Auge haben. Davon hängen nun gewisse Gesichtstäuschungen ab, die am deutlichsten zu beobachten sind an sehr entfernten Objecten, von deren wirklicher Lage man keine Erfahrungen hat, namentlich an den Gestirnen [2].

Man suche sich am gestirnten Himmel drei hinreichend helle und weit von einander entfernte Sterne, die nahehin in einer geraden horizontalen Linie stehen. Wir wollen voraussetzen, sie schienen in einer geraden Linie zu

---

[1] Herr E. Hering hat auf S. 274—283 seiner Beiträge zur Physiologie diese Ableitung als unhaltbar zu erweisen gesucht. Das Missverständniss des ersten Princips, welches oben erwähnt wurde, wobei er eine Nebensache zur Hauptsache gemacht hat, wirkt hier weiter. Er erklärt das zweite Princip für überflüssig neben dem ersten. Das ist es nicht. Denn das erste Princip bezweckt nur, dass ruhende Objecte als ruhend erkannt werden, so oft die Blicklinie in dieselbe Richtung zurückkehrt, das zweite, dass sie auch bei verschiedener Richtung der Blicklinie als ruhend erkannt werden. Herr Hering zeigt weiter, dass wenn man das zweite Princip ohne das erste gebraucht, man Unsinn daraus ableiten kann. Ich habe aber das zweite Princip nie anders, denn als Ergänzung des ersten angewendet, auch ist es selbstverständlich, dass dies nicht geht. Ich hoffe in der oben gegebenen Darstellung meine Ideen genauer ausgedrückt und das genannte Missverständniss beseitigt zu haben.

[2] Bei dem früher von mir beschriebenen entsprechenden Versuche hat die Convergenz der Augen einen eigenthümlichen Einfluss, der im nächsten Abschnitte zu besprechen ist.

stehen, wenn man das Gesicht so weit erhebt, dass die Primärstellung der Gesichtslinien auf den mittleren Stern gerichtet ist. Dann werden dieselben Sterne eine nach unten concave Linie zu bilden scheinen, wenn man ihre Reihe mit dem Blicke durchläuft, während das Gesicht weniger gehoben wird, als vorher, die Augen im Kopfe also mehr; und sie werden wie eine nach unten convexe Linie erscheinen, wenn das Gesicht mehr erhoben wird als früher und die Augen im Kopfe also gesenkt werden müssen, um nach den drei Sternen zu sehen. Der Grund dieser Täuschungen ist in den Raddrehungen des Auges zu suchen. Blickt man nach dem rechten Ende der Sternreihe, so sind bei gehobenem Blicke die Netzhauthorizonte gegen die Visirlinie so gedreht, dass ihre rechte Seite gehoben ist. Das rechte Ende der Sternenlinie erscheint dann gesenkt; eben so das linke, wenn man nach dem links gelegenen Sterne blickt, die ganze Linie also als concav nach unten; umgekehrt bei kinnwärts gewendetem Blick.

Oder man vergleiche die Neigung, welche eine Reihe von Sternen, wie zum Beispiel die drei Sterne im Schwanz des grossen Bären, gegen den Horizont zu haben scheinen, indem man das Gesicht so wendet, dass die Sterne bald mit nach rechts oben, bald mit nach links oben gehobenen Augen betrachtet werden. Man wird finden, dass bei ersterer Stellung das obere Ende dieser Sternreihe sich scheinbar mehr nach links, im zweiten Falle mehr nach rechts, also immer gegen die Medianebene des Kopfes hin, neigt.

Es handelt sich bei diesen Beispielen nicht um Bestimmung einer absoluten Richtung der Sternreihen im Raume, als senkrecht oder horizontal, da eine solche bei der unbestimmten Form des imaginären Himmelsgewölbes selbst nie eine ganz bestimmte sein kann. Es handelt sich nur die Uebereinstimmung oder Nichtübereinstimmung in der Richtung der angeschauten Bilder bei verschiedener Blickrichtung zu constatiren, und es zeigt sich bei diesen Versuchen, dass wir bei stark peripherischen Stellungen der Augen abweichende Urtheile über die Lage der Gesichtsobjecte im Gesichtsfelde oder auch über die Form des Gesichtsfeldes fällen. Da nun, wie gesagt, in einem ausgedehnten Felde solche Raddrehungen der Augen, die dergleichen Inconsequenzen hervorrufen, nicht ganz vermieden werden können, so kann nur gefordert werden, dass die Raddrehungen des Auges bei verschiedenen Stellungen der Gesichtslinie so gewählt werden, dass die Summe aller Fehler in der Orientirung, die aus den Raddrehungen des Auges herfliessen, möglichst klein werde.

Die vollkommene Erfüllung des zweiten Princips würde fordern, dass bei allen Stellungen der Blicklinie die Ebene der Drehungsaxen immer dieselbe Lage im Augapfel hätte. Es würde dann nie eine Componente der Drehung vorkommen, deren Axe die Normale zu jener Ebene der Drehungsaxen wäre, welche Normale ich die *atrope Linie* des Auges zu nennen vorgeschlagen habe. Jede Drehung um diese atrope Linie, deren Lage im Auge zunächst noch unbestimmt bleibt, würde als ein Fehler zu betrachten sein. Die Forderung des zweiten Princips würde also so formulirt werden können, dass *die Summe dieser Fehlerquadrate für alle vorkommenden unendlich kleinen Bewegungen des Auges ein Minimum werde*. Die Quadrate der Fehler

müssen hier aus denselben Gründen, wie bei den Fehlerausgleichungen nach der Methode der kleinsten Quadrate genommen werden.

Das Resultat der analytischen Behandlung dieses Problems, welche unten gegeben ist, ist folgendes: Damit die Summe der Fehler am kleinsten werde, muss die atrope Linie für jede Form des Feldes mit der Blicklinie zusammenfallen; die Vertheilung der Raddrehungen aber hängt im Allgemeinen von der Form des Feldes ab. In einem kreisförmigen Blickfelde würde das Listing'sche Gesetz den Bedingungen der Aufgabe am vollkommensten entsprechen, und zwar mit der Primärstellung im Centrum des kreisförmigen Feldes. In nicht genau, aber annähernd kreisförmigen Feldern würden gegen den Rand hin sich Abweichungen vom Listing'schen Gesetze zeigen müssen, deren Grösse aber durch den Umstand noch verringert werden kann, dass solche peripherische Stellen vom Blicke seltener durchlaufen werden, und wir, wie es scheint, auch diejenigen Bewegungsrichtungen des Auges zu vermeiden suchen, die dem Rande des Blickfelds parallel gehen und Scheinbewegungen der Objecte hervorbringen würden.

Es zeigt sich also hierbei, dass das Listing'sche Gesetz der Augenbewegungen das vortheilhafteste für die Orientirung ist, zunächst für ein einzelnes Auge und für ein kreisförmiges Blickfeld.

Nun sehen wir aber mit zwei Augen, welche bald parallel, bald convergirend gestellt werden. Das Princip der leichtesten Orientirung für Ruhestellungen fordert nur, dass die Raddrehungen der Augen dieselben seien, sobald dieselben Stellungen beider Augen wieder eintreten, und in der That finden wir kleine Abweichungen der Raddrehung bei Convergenzstellungen von denen bei Parallelstellungen. Es werden aber beim normalen Sehen Parallelstellungen in der Regel nur in denjenigen Theilen des Gesichtsfeldes vorkommen, welche sehr weit entfernte Objecte darzubieten pflegen; das sind die oberen Theile des Feldes.

Im unteren Theile des Blickfeldes finden sich fast ausschliesslich nahe Gegenstände vor; der entfernteste von ihnen ist der Fussboden. Das gemeinsame Blickfeld meiner beiden Augen bei paralleler Stellung habe ich in *Fig. 161* gezeichnet, *a* ist die Primärstellung des fernsehenden Auges, die Länge des Pfeils, *ac* bezeichnet die entsprechende Entfernung des Auges von der Tafel, auf die das Blickfeld projicirt ist; die Augen befinden sich dabei in Richtung des in *a* errichteten Lothes. Nach unten hin ist das Sehfeld jedes Auges auf der innern Seite eingeengt durch die hervortretende Nase, *bb* der Figur; was vom Nasenrücken noch fixirt werden kann, ist durch Schattirung angedeutet. Dieser untere Theil, welcher von den Doppelbildern der Nase theilweis

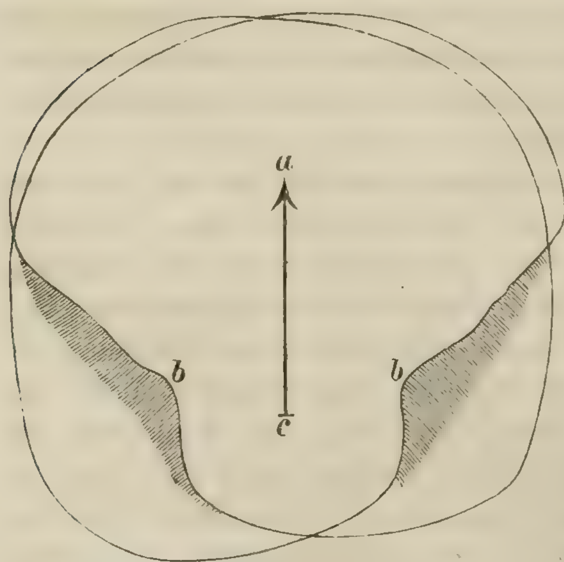


Fig. 161.

zugedeckt ist und der zwischen diesen Doppelbildern liegt, kann für parallele Augenstellungen fast gar nicht gebraucht werden, auch sind dieselben hier entschieden schwerer herzustellen, als im oberen Theile des Feldes. Wir können also etwa zwischen *bb* der Figur die Grenze ziehen für das Blickfeld der parallelen Gesichtslinien, dann bleibt für sie ein nahehin kreisförmiges Feld übrig, und ich finde hier in der That das Listing'sche Gesetz gültig, und die Primärstellung *a* in der Mitte dieses Feldes. Uebrigens sind die beiden Felder meiner Augen nicht ganz symmetrisch; mein linkes Auge kann weiter nach unten und aussen sehen als das rechte.

Bei Convergenzstellungen bekommen die Augen zuerst eben wegen der Convergenz eine Richtung nach innen, und zweitens überwiegend nach unten. Im oberen Theile des Blickfeldes kommen verhältnissmässig sehr selten nahe Gegenstände vor, die wir zu betrachten haben, auch sind wir nicht im Stande, die Convergenz dort so weit zu treiben, wie beim Blick nach unten. Daher sind für Convergenzstellungen Abweichungen von dem Bewegungsgesetze der Parallelstellungen in dem Sinne zu erwarten, als ob die Primärstellung für sie tiefer und mehr nach innen liegt, als für die Parallelstellungen; von dieser Art sind in der That die Abweichungen in der oben in *Fig. 157* gegebenen Uebersicht. Die Stärke dieser Abweichungen wird dann wohl von der gewohnheitsmässigen Häufigkeit der Convergenzstellungen und ihrer Stärke abhängen müssen, und bei kurzsichtigen Augen, welche hauptsächlich in Convergenz beobachten, werden sich die Eigenthümlichkeiten solcher Convergenzstellungen auch auf die verhältnissmässig seltner gebrauchten Fernstellungen übertragen können.

Bei dem hier gegebenen Versuche, das Gesetz der Augenbewegungen aus den Bedürfnissen des Wahrnehmens herzuleiten, musste natürlich abstrahirt werden von aller Kenntniss und Schätzung der Längen und Winkel des scheinbaren Gesichtsfeldes, ja selbst von der Kenntniss der Anordnung der Netzhautpunkte auf der Netzhaut, weil diese Kenntnisse, wenn man sie nicht als angeboren ansieht, erst durch die Bewegungen des Auges gewonnen werden können. In Wirklichkeit wird beides sich wohl neben einander und gleichzeitig entwickeln müssen, und es soll deshalb die gegebene Ableitung des Drehungsgesetzes nicht als eine genaue Beschreibung des factischen Entwickelungsgangs dieses Gesetzes während der ersten Kindheit angesehen werden. Vorläufig kann die empiristische Theorie der Gesichtswahrnehmungen in dieser Beziehung weiter nichts leisten, als nachweisen, dass in den Gesichtswahrnehmungen und bei den Bewegungen des Auges nichts vorkommt, was nicht durch Erfahrung und zweckmässige Einübung unter dem Bestreben, die Objecte der Aussenwelt möglichst genau und sicher zu erkennen, gewonnen werden könnte. Dabei wird natürlich der Gang dieser Einübung und Erfahrung methodischer und mehr in seine einzelnen Momente zerlegt dargestellt werden müssen, als er in Wirklichkeit in dem bunten Gedränge zufälliger Sinneseindrücke meistentheils vor sich gehen mag.

A. Fick und Wundt haben als regelndes Princip für die Augenbewegungen hingestellt, dass diejenige Raddrehung gewählt werde, bei welcher die gewünschte Richtung der Blicklinie mit der geringsten Muskelanstrengung erreicht werden

kann. Ueber die Durchführung dieses Princips wird unten das Nähere angegeben werden. Wahrscheinlich ist dasselbe thatsächlich erfüllt bei den wirklich vorhandenen normalen Augenbewegungen. Indessen glaubte ich mich nicht bei diesem Principe als dem letzten beruhigen zu dürfen, weil willkührliche Anstrengung nachweisbar diejenigen Stellungen des Augapfels herbeiführen kann, welche den Zwecken des Sehens am besten entsprechen, und die Muskeln im Allgemeinen bildsam genug sind, dass diejenigen, von denen man die grössere Anstrengung verlangt, auch bald die stärkeren werden. Indessen ist wohl nicht zu leugnen, dass wenn der Augenmuskelapparat vieler Generationen hinter einander sich den Bedürfnissen der Individuen angepasst hat und sich seine Anordnung auf die Nachkommen vererbt, für die factische Herbeiführung der zweckmässigsten Raddrehungen des Auges der Umstand, dass sie die leichtesten sind, ausserordentlich günstig einwirken muss. Die oben angeführten Versuche zeigen aber, dass die leichtesten Augenbewegungen für die Dauer dann nicht gewählt werden, wenn sie nicht auch gleichzeitig die vortheilhaftesten für das Sehen sind.

Aehnliche Gesetze wie für die Bewegungen der Augen gelten auch für die des Kopfes. Es hat schon AUBERT bemerkt, wenn man den Kopf plötzlich nach einer Seite neigt, während man einen festen Punkt einer geraden verticalen oder horizontalen Linie fixirt, so dass ihr Bild auf der Netzhaut eine Drehung erleidet, dass dann entweder bei der Bewegung des Kopfes eine scheinbare Drehung jener Linie eintritt, oder man wenigstens eine gewisse Unsicherheit fühlt, zu entscheiden, ob eine Drehung eingetreten sei oder nicht.

Die gewöhnlichen Bewegungen des Kopfes geschehen übrigens nach demselben Princip, wie die der Augen. Das Hinterhauptsgelenk besteht aus zwei Gelenken, dem zwischen Hinterhauptsbein und dem ersten Halswirbel oder Atlas, und dem Gelenke zwischen dem Atlas und dem zweiten Halswirbel. Das erste lässt eine Drehung um eine horizontal von rechts nach links gehende Axe, und in geringer Ausdehnung auch eine Drehung um eine horizontal von vorn nach hinten gehende Axe zu; das zweite genannte Gelenk hat nur eine verticale Drehungsaxe. Beide Gelenke zusammen können also mässige Drehungen um alle beliebig gelegenen Axen zulassen. Dazu kommt dann noch die Beweglichkeit der Halswirbelsäule. Wenn man die Augen weit nach rechts oder links wenden will, dreht sich der Kopf um eine senkrechte Axe im unteren Gelenke; wenn der Blick gerade nach oben oder unten gewendet wird, dreht sich der Kopf um die horizontal von rechts nach links gehende Drehungsaxe der Gelenkknöpfe des Hinterhauptbeins; wenn er aber schräg nach rechts und oben gekehrt wird, so dreht er sich, wie das Auge, um eine von oben rechts nach unten links gehende Axe, so dass die rechte Seite des Kopfes höher zu stehen kommt, als die linke. Wenn der Blick dagegen nach unten rechts sich wendet, kommt die rechte Seite des Kopfes tiefer zu stehen. Es sind dies also Drehungen derselben Art, wie sie das Auge ausführt, wenn auch mit grösserer Freiheit veränderlich, als die des Auges.

Allgemeine geometrische Betrachtung der Drehungen. Man denke sich einen gewöhnlichen Erdglobus, der mit seiner Polaxe drehbar in einem messingenen Ringe befestigt ist; dieser Meridianring möge selbst in Einschnitten

des hölzernen Gestells verschoben und endlich das Gestell auf einem horizontalen Tische stehend gedreht werden können, wobei es sich um die Lothlinie als Axe dreht. Eine solche Befestigungsweise reicht hin, um den Globus in alle möglichen Lagen zu versetzen. Der Globus möge den Augapfel darstellen und die Pollinie möge der Blicklinie entsprechen.

Im Anfang möge die Pollinie senkrecht stehen, und der erste Meridian des Globus, der von Ferro, in der Ebene des Ringes stehen. Die verticalen Coordinaten (also der Blicklinie in ihrer Anfangsstellung parallel) nenne ich x, die Ebene des ersten Meridians und des Meridianringes sei die Ebene der xy, die y Axe also horizontal in der Ebene des Ringes und die z Axe senkrecht darauf. Alle diese Axen sollen durch den Mittelpunkt der Kugel gehen. Da es ganz willkührlich ist, wie wir im Auge die y und z Axe legen, so wollen wir annehmen, die atrope Linie liege in ihrer Anfangslage in der y Ebene. Es vereinfacht sich dadurch die Rechnung sehr merklich, ohne dass die Allgemeinheit derselben beeinträchtigt wird. In dem Globus, der den Augapfel darstellen soll, würde also die atrope Linie irgend wo im Meridian von Ferro liegen.

Wir denken uns nun vier rechtwinkelige Coordinatensysteme, welche alle in der Anfangslage der Kugel mit einander zusammenfallen. Das erste derselben nennen wir xyz, es sei absolut fest im Raume. Das zweite nennen wir $x_1 y_1 z_1$, es sei beweglich zugleich mit dem Gestell des Globus und mit diesem Gestelle fest verbunden; das dritte nennen wir $x_2 y_2 z_2$, es sei fest verbunden mit dem messingenen Meridianringe; das vierte endlich nennen wir $\xi v \zeta$, es sei fest mit der Kugel verbunden.

Wenn das Gestell auf dem Tische gedreht wird, so verschiebt sich das Coordinatsystem der $x_1 y_1 z_1$ gegen das der xyz; da aber die x Axe Drehungsaxe ist, so bleibt die x_1 Axe zusammenfallend mit der x Axe, und die $y_1 z_1$ Ebene mit der yz Ebene. Folglich ist auch nach der Drehung die Entfernung x_1 eines jeden beliebigen Punktes von der $y_1 z_1$ Ebene ebenso gross wie seine Entfernung x von der yz Ebene. Es sei in *Fig. 162* die Ebene des Papiers die Ebene der yz und $y_1 z_1$; es sei OA die Axe der y, OH die der z, OD die der y_1, OE die der z_1; C sei die Projection des Punktes, dessen Coordinaten gesucht werden. Man fälle von C die Lothe CA, CB, CD, CE beziehlich auf die vier Coordinataxen, und endlich noch vom Punkte E die Lothe EG und EH auf OA und OB, deren Schnittpunkt wir mit K bezeichnen, so ist

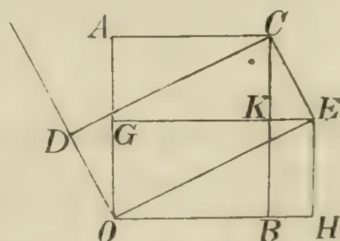


Fig. 162.

$$OA = CB = y \qquad OD = CE = y_1$$
$$OB = AC = z \qquad OE = CD = z_1.$$

Den Winkel EOH, um den das System der $x_1 y_1 z_1$ gegen das der xyz gedreht ist, nennen wir ϑ.

$$y = OA = OG + GA = OG + KC.$$

Da nun der Winkel $GEO = ECK = EOH = \vartheta$ ist, so ist

$$OG = OE \sin (GEO) = z_1 \sin \vartheta$$

$$KC = CE \cos (ECK) = y_1 \cos \vartheta,$$

folglich

$$y = y_1 \cos \vartheta + z_1 \sin \vartheta$$

und ebenso

$$z = OB = OH - KE$$
$$OH = OE \cos(EOH) = z_1 \cos \vartheta$$
$$KE = EC \sin(ECK) = y_1 \sin \vartheta,$$

also

$$z = z_1 \cos \vartheta - y_1 \sin \vartheta.$$

Wir haben also für die Coordinaten xyz des durch die $x_1 y_1 z_1$ gegebenen Punktes nach der Drehung folgende Werthe:

$$\left.\begin{aligned} x &= x_1 \\ y &= y_1 \cos \vartheta + z_1 \sin \vartheta \\ z &= -y_1 \sin \vartheta + z_1 \cos \vartheta \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 1).$$

Wenn ferner der Messingring des Globus in dem Gestelle gedreht wird, so ändert sich die Lage des Systems der $x_2 y_2 z_2$ gegen das der $x_1 y_1 z_1$, wobei die $y_2 x_2$ Ebene aber mit der $y_1 x_1$ Ebene in Congruenz bleibt, und also auch die z_2 Axe mit der z_1 Axe. Der Drehungswinkel sei α, die Werthe der Coordinaten $x_1 y_1 z_1$ findet man ausgedrückt in die der $x_2 y_2 z_2$ ähnlich wie vorher

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= x_2 \cos \alpha - y_2 \sin \alpha \\ y_1 &= x_2 \sin \alpha + y_2 \cos \alpha \\ z_1 &= z_2 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,a).$$

Endlich drehe man den Globus um seine Polaxe, dabei verschiebt sich das System der $\xi v \zeta$ gegen das der $x_2 y_2 z_2$, während die ξ und x_2 Axe, als Drehungsaxe, congruent bleiben. Die Werthe der $x_2 y_2 z_2$ sind, wenn der Drehungswinkel mit ω bezeichnet wird

$$\left.\begin{aligned} x_2 &= \xi \\ y_2 &= v \cos \omega + \zeta \sin \omega \\ z_2 &= -v \sin \omega + \zeta \cos \omega \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,b).$$

Nun setze man die Werthe von $x_1 y_1 z_1$ aus 1 a) in die Gleichungen 1); man erhält

$$x = x_2 \cos \alpha - y_2 \sin \alpha$$
$$y = x_2 \sin \alpha \cos \vartheta + y_2 \cos \alpha \cos \vartheta + z_1 \sin \vartheta$$
$$z = -x_2 \sin \alpha \sin \vartheta - y_2 \cos \alpha \sin \vartheta + z_2 \cos \vartheta.$$

In diese Gleichungen endlich setze man für $x_2 y_2 z_2$ deren Werthe aus den Gleichungen 1 b). Man erhält

$$\left.\begin{aligned} x &= \xi \cos \alpha - v \cos \omega \sin \alpha - \zeta \sin v \sin \alpha \\ y &= \xi \sin \alpha \cos \vartheta + v\,(\cos \alpha \cos \vartheta \cos \omega - \sin \vartheta \sin \omega) \\ &\qquad + \zeta\,(\cos \alpha \cos \vartheta \sin \omega + \sin \vartheta \cos \omega) \\ z &= -\xi \sin \alpha \sin \vartheta - v\,(\cos \alpha \sin \vartheta \cos \omega + \cos \vartheta \sin \omega) \\ &\qquad - \zeta\,(\cos \alpha \sin \vartheta \sin \omega - \cos \vartheta \cos \omega) \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 1\,c).$$

Dadurch sind die Raum-Coordinaten xyz jedes Punktes gegeben, der durch seine Coordinaten $\xi v \zeta$ auf oder in der Kugel gegeben ist.

Bestimmen wir zunächst die Lage der Polaxe, welche der Blicklinie des Auges entsprechen soll; sie ist die Axe der ξ, für ihre Punkte ist $v = \zeta = 0$. Daraus folgt dann für einen Punkt der Polaxe, welcher um ξ vom Drehpunkte entfernt ist

$$x = \xi \cos \alpha$$
$$y = \xi \sin \alpha \cos \vartheta$$
$$z = - \xi \sin \alpha \sin \vartheta.$$

Der Winkel zwischen der Polaxe und ihrer Anfangsstellung ist also α, und die Projection der Polaxe auf die Horizontalebene ist $\xi \sin \alpha$, welche mit der xyEbene den Winkel ϑ macht. Diese Projection ist nun aber die Schnittlinie einer durch die verticale xAxe und die Polaxe ξ gelegten Ebene mit der Horizontalebene. Uebertragen wir diese Verhältnisse auf das Auge, so ist

α der Winkel zwischen der ersten und zweiten Lage der Blicklinie

ϑ der Winkel, den eine durch die erste und zweite Lage gelegte Ebene mit der ursprünglichen xyEbene bildet.

Durch beide Winkel ist die Richtung der Blicklinie gegeben.

Um nun noch den Sinn des Winkels ω für die Verhältnisse am Auge anschaulich zu machen, wollen wir fragen, wie muss der Winkel ω gewählt werden, wenn sich das Auge nach dem Gesetze von Listing bewegt, und die Anfangslage, wo die xyz mit den $\xi v \zeta$ zusammenfallen, seine Primärlage ist. Dann müsste nach diesem Gesetze die neue Stellung die gleiche sein, als wäre das Auge durch Drehung um eine in der $v\zeta$ und yzEbene liegende Drehungsaxe in die neue Lage übergeführt worden. Da die Punkte der Drehungsaxe unveränderte Lage behalten, so muss für sie auch nach der Drehung

$$x = \xi \qquad y = v \qquad z = \zeta \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

sein. Durch diese drei Bedingungen können wir in allen Fällen die Lage der Drehungsaxe finden. Da der Forderung des Listing'schen Gesetzes gemäss die Drehungsaxe in der $v\zeta$Ebene liegen, das heisst für ihre Punkte $\xi = 0$ sein soll, so erhalten wir aus den Gleichungen 1 c) nach Einsetzung dieser Werthe

$$o = - v \cos \omega \sin \alpha - \zeta \sin \omega \sin \alpha$$
$$v = v (\cos \alpha \cos \vartheta \cos \omega - \sin \vartheta \sin \omega) + \zeta (\cos \alpha \cos \vartheta \sin \omega + \sin \vartheta \cos \omega)$$
$$\zeta = - v (\cos \alpha \sin \vartheta \cos \omega + \cos \vartheta \sin \omega) - \zeta (\cos \alpha \sin \vartheta \sin \omega - \cos \vartheta \cos \omega).$$

Aus der ersten Gleichung folgt:

$$v \cos \omega + \zeta \sin \omega = 0,$$

was erfüllt wird, wenn wir setzen

$$v = h \sin \omega, \qquad \zeta = - h \cos \omega,$$

worin h eine willkührliche Grösse bedeutet. Dadurch reduciren sich die beiden andern Gleichungen auf die Bedingungen

$$\sin \omega = - \sin \vartheta$$
$$- \cos \omega = - \cos \vartheta,$$

die zu erfüllen sind durch die Annahme

$$\omega = - \vartheta \quad \ldots \ldots \quad 2\text{a}).$$

Dies ist also die Bedingung, dass die durch die Gleichungen 1 c) gegebenen Drehungen dem LISTING'schen Gesetze folgen. Dann werden die Werthe x, y, z

$$\left.\begin{aligned} x &= \xi \cos\alpha - v \cos\vartheta \sin\alpha + \zeta \sin\vartheta \sin\alpha \\ y &= \xi \sin\alpha \cos\vartheta + v (\cos\alpha \cos\vartheta^2 + \sin\vartheta^2) \\ &\qquad + \zeta (1 - \cos\alpha) \sin\vartheta \cos\vartheta \\ z &= -\xi \sin\alpha \sin\vartheta - v (\cos\alpha - 1) \sin\vartheta \cos\vartheta \\ &\qquad + \zeta (\cos\alpha \sin\vartheta^2 + \cos\vartheta^2) \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad 2b).$$

Zu bemerken ist noch, dass überhaupt, auch abgesehen von LISTING's Gesetz, die Summe $\omega + \vartheta$ für sehr kleine Werthe von α jedenfalls verschwindend klein werden muss, wenn nicht Verschiebungen der Blicklinie um unendlich kleine Werthe von α endliche Lagenveränderungen des Auges ergeben sollen.

In den Gleichungen 2b) ist x die Entfernung des Punktes, dessen Coordinaten hier gegeben sind, von der yzEbene; ξ ist die Entfernung desselben Punktes von der $v\zeta$Ebene. Beide sind positiv genommen, wenn sie vor der Vorderseite dieser Ebenen liegen. Setzt man nun

$$x = -\xi \quad \text{oder} \quad x + \xi = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2c),$$

so ist dies die Gleichung aller der Punkte, die gleichweit von der Vorderseite der Ebene $x = 0$ und von der Hinterseite der Ebene $\xi = 0$ abstehen. Diese Eigenschaft kommt aber den Punkten derjenigen Ebene zu, welche den Winkel ϑ, den die Ebenen $x = 0$ und $\xi = 0$ mit einander machen, halbirt. Die Gleichung 2c) ist also die Gleichung dieser Halbirungsebene. Diese Gleichung wird, wenn man den Werth von x aus 2b) entnimmt

$$0 = \xi (1 + \cos\alpha) - v \cos\vartheta \sin\alpha + \zeta \sin\vartheta \sin\alpha \quad . \quad . \quad 2d).$$

Indem wir diese Gleichung mit dem Factor

$$\frac{1 - \cos\alpha}{\sin\alpha}$$

multipliciren, erhalten wir

$$0 = \xi \sin\alpha - v \cos\vartheta (1 - \cos\alpha) + \xi \sin\vartheta (1 - \cos\alpha) \quad . \quad . \quad . \quad 2e).$$

Multipliciren wir diese letztere mit $\cos\vartheta$, so erhalten wir

$$0 = \xi \sin\alpha \cos\vartheta + v (\cos\alpha \cos\vartheta^2 - \cos\vartheta^2) + \zeta \cos\vartheta \sin\vartheta (1 - \cos\alpha).$$

Bei der Vergleichung mit dem Werthe von y in 2b) zeigt sich, dass diese identisch ist mit

$$v = y.$$

Eine entsprechende Gleichung, welche man durch Multiplication von 2e) mit $\sin\vartheta$ erhält, ist identisch mit

$$\zeta = z.$$

Für die Punkte der Halbirungsebene des Winkels ϑ, den die Ebenen $x = 0$ und $\xi = 0$ mit einander machen, ist also

$$x = -\xi, \quad y = v, \quad z = \zeta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2f).$$

Nehmen wir nun eine zweite Stellung des Bulbus, für die wir die Werthe von x, y, z, α, ϑ beziehlich mit x_0, y_0, z_0, α_0, ϑ_0 bezeichnen, so ist für die Halbirungsebene des Winkels ϑ_0, welchen die Ebenen $x_0 = 0$ und $\xi = 0$ mit einander machen, ebenfalls

$$x_0 = -\xi, \qquad y_0 = v, \qquad z_0 = \zeta.$$

Wenn also der Punkt $\xi v \zeta$ gleichzeitig beiden Halbirungsebenen angehört, das heisst in deren Schnittlinie liegt, so ist für ihn

$$x = x_0, \qquad y = y_0, \qquad z = z_0.$$

Die Punkte der genannten Schnittlinie haben also dieselbe Lage im Raume bei der ersten wie bei der zweiten Stellung des Auges, und daraus folgt, dass wenn man das Auge aus der ersten in die zweite Stellung durch Drehung um eine constante Axe überführen will, die genannte Schnittlinie der Halbirungsebenen dabei als Axe zu benutzen ist. Die Lage dieser Axe ist gegeben durch die Gleichung 2b) und die analoge Gleichung für die zweite Stellung

$$x + \xi = 0 \quad \text{und} \quad x_0 + \xi = 0.$$

Der Winkel, durch den der Bulbus um die resultirende Drehungsaxe hierbei gedreht werden muss, um die erste Stellung in die zweite überzuführen, ist doppelt so gross, als der Winkel, unter dem sich die genannten beiden Halbirungsebenen $x + \xi = 0$ und $x_0 + \xi = 0$ gegenseitig schneiden.

Die hier gegebene Regel, nach welcher das Resultat zweier auf einander folgender Drehungen auf eine einzige Drehung reducirt wird, kann ganz unabhängig vom Listing'schen Gesetze auf jeden Körper übertragen werden, der sich um einen Punkt dreht. Wenn ein solcher Körper nach einander um zwei verschiedene Axen gedreht wird, und man kennt die Lage beider Axen, die sie haben, während die Drehung um sie geschieht, oder, was dasselbe ist, die sie haben nach der ersten Drehung und vor der zweiten Drehung, so lege man durch beide Axen eine Ebene, welche A heissen mag und construire die Lage dieser Ebene, welche sie hat vor der ersten Drehung, A_0, und diejenige, welche sie hat nach der zweiten Drehung, A_1. Da die Drehungsaxen die Schnittlinien von A_0 und A, so wie von A_1 und A sind, so ist dies ohne Schwierigkeit auszuführen, sobald man die Grösse der Drehungswinkel kennt, welches der Winkel $A_0 A$ und $A_1 A$ sind. Man construire die Halbirungsebenen beider Winkel; deren Schnittlinie ist die resultirende Drehungsaxe, der doppelte Werth des Winkels, unter dem sich die beiden Halbirungsebenen schneiden (gleichgültig welchen von den beiden Winkeln man nimmt), ist der Drehungswinkel.

Wenn die Drehungen unendlich klein sind, so liegt die resultirende Drehungsaxe unendlich wenig von der Ebene entfernt, welche die beiden anderen Axen enthält, und fällt im Grenzfalle mit der Diagonale des Parallelogramms zusammen, dessen zwei Seiten der Richtung nach mit den beiden Drehungsaxen zusammenfallen und eine der Grösse der Drehungswinkel proportionale Länge haben.

Wir kehren zurück zu den Folgerungen aus dem Listing'schen Gesetze für die Bewegungen des Bulbus. Da die Drehungsaxe, um welche das Auge zu drehen ist, um es aus der Stellung der Gleichungen 2b) überzuführen in irgend eine andere Stellung mit den Coordinaten x_0, y_0, z_0, jedenfalls in der Ebene $x + \xi = 0$ liegt, welches auch die zweite Stellung sei, so folgt, dass jedes Mal, wo man von einer bestimmten Anfangsstellung des Bulbus in beliebige andere Stellungen durch Drehung um feste Axen übergehen will, diese Drehungsaxen alle in einer gewissen Ebene liegen müssen, deren Lage nur von der Anfangsstellung abhängt, nicht von der zu er-

reichenden Stellung, und dass ferner jede Drehung von beliebiger Grösse um eine der in der genannten Ebene liegenden Axen das Auge aus der zugehörigen Anfangsstellung immer wieder in neue Stellungen überführt, die dem LISTING'schen Gesetze entsprechen.

Die Primärstellung der Blicklinie ist also nur dadurch ausgezeichnet, dass die zugehörige Ebene der Drehungsaxen auf der Blicklinie senkrecht steht.

Die Lage der Normale auf der Ebene der Drehungsaxen für irgend eine Lage der Blicklinie findet man also, wenn man den Winkel zwischen der zeitigen Lage der Blicklinie und ihrer Primärstellung halbirt. Man kann diese Normale die *zeitige atrope Linie* für die betreffende Augenstellung nennen.

Bei jeder fortgesetzten Drehung um eine Axe, welche das Auge in Uebereinstimmung mit dem LISTING'schen Gesetze ausführt, wird die zeitweilige atrope Linie der Anfangsstellung einen grössten Kreis auf dem kugeligen Blickfelde beschreiben, weil sie senkrecht zur Drehungsaxe im Drehpunkte steht. Die Blicklinie aber, welche im Allgemeinen nicht senkrecht zur Drehungsaxe, wird keinen grössten Kreis, sondern einen Parallelkreis zum grössten Kreise der relativ atropen Linie ihrer Anfangsstellung beschreiben.

Es sei in *Fig. 163* O der Drehpunkt des Auges, AO die Primärstellung der Blicklinie, OB eine zweite Stellung derselben. Der Kreis $ACBDF$ stelle den Durchschnitt des kugelig gedachten Blickfeldes vor. Der Winkel AOB werde halbirt durch GOC, so ist GOC die atrope Linie für die Stellung der Blicklinie in OB, und wenn OD ein Loth zu OC ist, so würde eine senkrecht zur Ebene der Zeichnung durch OD gelegte Ebene die Ebene der Drehungsaxen für OB sein. Nun ist leicht zu sehen, dass wenn wir AO bis F verlängern, die Winkel BOD und FOD gleich sind, da sie die Complemente der gleichen Winkel BOC und GOF sind. Daraus folgt weiter, dass wenn OE irgend eine andere Axe in der durch OD gelegten Ebene der Drehungaxen ist, auch die Winkel BOE und FOE gleich sein müssen.

Fig. 163.

Wenn man also den Bulbus um die Axe OE ganz herumdrehen könnte, würde die Linie OB auch in die Lage OF kommen müssen. Folglich müssen auch die Kreise, welche die Blicklinie, ausgehend von der Stellung OB, bei der Drehung um eine feste Axe dem LISTING'schen Gesetze gemäss im kugeligen Blickfelde beschreibt, alle durch den Punkt F gehen. Die Lage des Punktes F ist aber ganz unabhängig von der Lage von OB, nur abhängig von der Primärstellung OA. Wir können ihn den *Occipitalpunkt des Blickfeldes* nennen. Daraus folgt:

> *Alle Kreisbögen, welche die Blicklinie bei der Drehung um eine feste Axe dem LISTING'schen Gesetze gemäss im kugeligen Blickfelde beschreibt, gehen verlängert durch den Occipitalpunkt des Blickfeldes.*

Und umgekehrt:

> *Wenn die Blicklinie dem LISTING'schen Gesetze entsprechend einen Kreisbogen im kugeligen Blickfelde beschreibt, der durch den Occipitalpunkt des Blickfeldes geht, so dreht sie sich dabei um eine festbleibende Axe, die senkrecht zur Ebene des betreffenden Kreises ist.*

Wir wollen diese Kreise des kugeligen Blickfeldes, welche durch den

Occipitalpunkt gehen, Directionskreise nennen. Ihre Wichtigkeit für die Orientirung wird sich noch in den nächsten Abschnitten mehr zeigen. Die Directionskreise sind also grösste Kreise des Blickfeldes nur, wenn sie durch die Primärstellung der Blicklinie gehen, deren Ort im Blickfelde wir den Hauptblickpunkt nennen können.

Es ergiebt sich ferner leicht, dass wenn ein linienförmiges Nachbild im Auge entwickelt ist, welches sich in das Blickfeld auf einen Directionskreis der betreffenden Stellung der Blicklinie projicirt, und das Auge in Richtung dieses Directionskreises bewegt wird, das Nachbild seine scheinbare Lage in diesem Directionskreise behalten und sich nur in Richtung seiner eigenen Länge verschieben wird. Und wenn ein Nachbild entwickelt ist, welches durch den Blickpunkt senkrecht zu einem der betreffenden Directionskreise schneidet, es bei der Bewegung des Blicks in diesem Directionskreise senkrecht zu demselben bleiben wird.

Endlich ist auch leicht einzusehen, dass das Nachbild congruiren wird mit der Richtung aller derjenigen Directionskreise, die im Occipitalpunkt die gleiche Tangente mit demjenigen haben, mit dem es zuerst congruirte.

Die Gleichung der Directionskreise, welche durch eine bestimmte Stellung der Blicklinie hindurchgehen, z. B. durch die in den Gleichungen 2 b) gegebene, ergiebt sich leicht aus der Bedingung, dass sie durch eine Ebene, welche durch den Occipitalpunkt geht, aus dem kugelförmigen Blickfelde ausgeschnitten werden, dessen Mittelpunkt der Drehpunkt des Auges, der Anfangspunkt unserer Coordinaten ist. Es sei also die Gleichung des kugelförmig gedachten Blickfeldes

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \Big\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3).$$

Die allgemeine Gleichung einer Ebene ist

$$ax + by + cz = A.$$

Die Coordinaten des Occipitalpunktes sind

$$x = -R, \qquad y = 0, \qquad z = 0.$$

Diese in die Gleichung der Ebene gesetzt, müssen dieser genügen, also

$$-aR = A.$$

Dadurch ist die unbekannte Grösse A bestimmt, und die Gleichung einer beliebigen Ebene, die durch den Occipitalpunkt geht, wird also

$$ax + by + cz = -aR \Big\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3a).$$

Die beiden Gleichungen 3) und 3 a) sind also die Gleichungen eines beliebigen Directionskreises.

Schreiben wir diese beiden Gleichungen wie folgt:

$$x^2\left(1 + \frac{y^2}{x^2} + \frac{z^2}{x^2}\right) = R^2$$

$$x^2\left(1 + \frac{b}{a}\,\frac{y}{x} + \frac{c}{a}\,\frac{z}{x}\right)^2 = R^2$$

und dividiren sie durch einander, so erhalten wir

$$1 + \frac{y^2}{x^2} + \frac{z^2}{x^2} = \left(1 + \frac{b}{a}\,\frac{y}{x} + \frac{c}{a}\,\frac{z}{x}\right)^2 \Big\} \quad . \; . \; . \; . \quad 3b).$$

Dies ist die Gleichung eines Kegels, dessen Spitze im Anfangspunkt der Coordinaten liegt, und der durch den Directionskreis hindurchgeht. Das letztere ist der Fall, weil wir die Gleichung 3b) aus den Gleichungen 3) und 3a) abgeleitet haben, in denen x, y, z die Coordinaten eines beliebigen Punktes des Directionskreises bezeichnen, und ein Kegel ist die in 3b) gegebene Fläche, weil die Gleichung 3b), wenn sie erfüllt wird durch die Coordinaten eines Punktes x, y, z, auch erfüllt wird durch die Coordinaten aller derjenigen Punkte, für welche die Verhältnisse $\frac{y}{x}$ und $\frac{z}{x}$ dieselben Werthe haben.

Wenn aber $\frac{y}{x} = C_0$ und $\frac{z}{x} = C_1$ gesetzt werden, so sind dies die Gleichungen einer geraden Linie, die durch den Mittelpunkt der Coordinaten geht. Da also alle Punkte einer geraden Linie, die durch den Mittelpunkt der Coordinaten und durch einen Punkt der Fläche 3b) geht, ganz in dieser Fläche liegt, so ist diese Fläche eine Kegelfläche.

Die geraden Linien, die in der Oberfläche dieses Kegels zu ziehen sind, sind die Richtungen, welche die Blicklinie annimmt, wenn sie den betreffenden Directionskreis durchläuft.

Wenn ein linienförmiges Nachbild in Richtung eines Directionskreises entworfen wird, so bleibt, wie wir hervorgehoben haben, das Nachbild in dem Directionskreise liegen, wenn das Auge dessen einzelne Punkte durchläuft. Oben haben wir die Nachbilder auf eine Ebene projicirt, die senkrecht zur Primärstellung des Auges war, deren Gleichung also ist

$$x = C.$$

Setzen wir in 3b) das x constant, so wird 3b) die Gleichung einer Hyperbel, welche die Projection des Directionskreises auf die genannte Ebene ist. Sie ist

$$0 = (b^2 - a^2)\, y^2 + (c^2 - a^2)\, z^2 + 2bcyz + 2abxy + 2acxz \Big\}\ldots 3\text{c}).$$

In dieser allgemeinen Form giebt die Gleichung alle Hyperbeln, längs welcher irgend wie gerichtete linienförmige Nachbilder verschoben werden können.

Beschränken wir uns dagegen auf solche, welche ursprünglich einer bestimmten Richtung parallel waren, zum Beispiel der zAxe, so ist in der Gleichung des Directionskreises 3a) die Constante $c = 0$ zu setzen, und setzen wir ferner

$$a = -\sin\frac{\alpha}{2} \qquad b = +\cos\frac{\alpha}{2}$$

so wird die Gleichung 3c)

$$0 = y^2 \cos\alpha - z^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} - xy\sin\alpha$$

oder

$$\cos\alpha \left(y - \frac{1}{2}\, x \operatorname{tg}\alpha\right)^2 - z^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} = \frac{1}{4}\, x^2 \cos\alpha \operatorname{tg}^2\alpha.$$

Setzt man

$$\frac{1}{2}\, x \operatorname{tang}\alpha = f$$

und

$$x\sqrt{\frac{\operatorname{tang}\alpha}{2\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}}} = g,$$

so wird die Gleichung der Hyperbel

$$\frac{(y - f)^2}{f^2} - \frac{z^2}{g^2} = 1.$$

Es ist also f die reelle Axe, g die imaginäre, und der Mittelpunkt der Hyperbel um die Länge der reellen Axe von der Linie $z = 0$ entfernt. Der eine Scheitel aller dieser Hyperbeln liegt in der xAxe, im Punkte $z = 0$, $y = 0$, aber diejenigen Zweige der Hyperbeln, welche durch diesen Punkt gehen, sind keine optischen Projectionen des betreffenden Directionskreises. Sie sind vielmehr nur geometrische Projectionen der hinteren nicht sichtbaren Hälfte des Directionskreises. Hyperbeln dieser Art sind oben construirt in *Fig. 154*.

Es bleibt noch übrig, die Drehung zu bestimmen, welche nach dem LISTING'schen Gesetze das Auge in Beziehung auf die Visirebene erleidet. Es sei die Ebene $v = 0$ der Netzhauthorizont des Auges, und $y = 0$ also seine Primärstellung, und gleichzeitig die Primärstellung der Visirebene. Die yAxe ist dann die Linie, welche die Drehpunkte beider Augen verbindet. Die Visirebene muss also immer durch die yAxe gehen. Die allgemeine Gleichung solcher Ebenen ist

$$ax + bz = 0.$$

Für die Blicklinie ist $v = \zeta = 0$, also nach 2b)

$$x = \xi\cos\alpha, \qquad y = \xi\sin\alpha\cos\vartheta, \qquad z = -\xi\sin\alpha\sin\vartheta$$

und da die Blicklinie in der Visirebene liegen muss, folgt, dass diese Werthe von x und z der allgemeinen Gleichung der Visirebene genügen müssen, also

$$a\xi\cos\alpha - b\xi\sin\alpha\sin\vartheta = 0.$$

Dem genügen wir, wenn wir setzen

$$a = \sin\alpha\sin\vartheta, \qquad b = \cos\alpha.$$

Die Gleichung der Visirebene wird also

$$x\sin a\sin\vartheta + z\cos\alpha = 0$$

oder wenn wir die Werthe aus 2b) einsetzen

$$0 = v\cos\vartheta\sin\vartheta\,(1 - \cos\alpha) - \zeta\,(\sin^2\vartheta + \cos\alpha\cos^2\vartheta)\Big\} \ldots 4).$$

Wenn die Gleichungen zweier Ebenen sind

$$ax + by + cz + d = 0$$

$$\alpha x + \beta y + \gamma z + \delta = 0,$$

so ist der Winkel k, den sie mit einander machen, bekanntlich

$$\cos k = \frac{a\alpha + b\beta + c\gamma}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}}.$$

Daraus folgt, dass der Winkel, den die Visirebene der Gleichung 4) mit dem Netzhauthorizont macht, dessen Gleichung ist

$$0 = v \zeta \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 4\text{a})$$

gegeben wird durch die Gleichung

$$\cos k = \frac{\cos\vartheta \sin\vartheta\,(1 - \cos\alpha)}{\sqrt{\sin^2\vartheta + \cos^2\alpha \cos^2\vartheta}}$$

oder

$$\left.\operatorname{cotang} k = \frac{\cos\vartheta \sin\vartheta\,(1 - \cos\alpha)}{\sin^2\vartheta + \cos\alpha \cos^2\vartheta}\right\} \quad \ldots \ldots \quad 4\text{b}).$$

Der Winkel k, welcher zwischen der zeitigen Lage des Netzhauthorizonts und der Visirebene liegt, ist hierdurch gegeben.

Der Winkel k' zwischen der Ebene des ursprünglich senkrechten Meridians $\zeta = 0$ und einer durch die senkrechte z Axe und die Blicklinie gelegten Ebene

$$x \sin\alpha \cos\vartheta - y \cos\alpha = 0$$

wird in ähnlicher Weise gefunden

$$\left.\operatorname{tg} k_1 = \frac{\cos\vartheta \sin\vartheta\,(1 - \cos\alpha)}{\sqrt{\cos^2\vartheta + \sin^2\vartheta \cos\alpha}}\right\} \quad \ldots \ldots \quad 4\text{c}).$$

Nun sind häufig nicht die Winkel α und ϑ zur Abmessung der Stellung der Blicklinie gebraucht worden, sondern entweder der Erhebungswinkel λ und Seitenwendungswinkel μ, wie sie oben definirt wurden, oder die Winkel, welche FICK die *Longitudo* und *Latitudo* genannt hat, die mit l und m bezeichnet werden mögen. Diese sind noch in die Formeln 4 b) und 4 c) einzuführen, um sie zur Berechnung so ausgeführter Versuche geschickt zu machen.

Der Erhebungswinkel λ ist der Winkel zwischen der Visirebene

$$x \sin\alpha \sin\vartheta + z \cos\alpha = 0$$

und der Ebene $x = 0$, seine Tangente ist hiernach

$$\operatorname{tang}\lambda = \frac{z}{x} = -\operatorname{tang}\alpha \sin\vartheta.$$

Der Seitenwendungswinkel ist gleich dem Winkel zwischen der Aequatorialebene des Auges $\xi = 0$ und der Ebene, welche durch die y Axe senkrecht zur Visirebene geht

$$x \cos\alpha - z \sin\alpha \sin\vartheta = 0$$

oder nach Substitution der Werthe aus 2 b)

$$0 = \xi\,[\cos^2\alpha + \sin^2\alpha \sin^2\vartheta] - v \sin\alpha \cos\vartheta\,[\sin^2\vartheta + \cos\alpha \cos^2\vartheta] \\ + \zeta \sin\alpha \sin\vartheta \cos^2\vartheta\,[\cos\alpha - 1],$$

woraus nach denselben Regeln wie oben folgt, dass der Winkel μ zwischen dieser Ebene und der Ebene $\xi = 0$, sei

$$\cos\mu = \sqrt{\cos^2\alpha + \sin^2\alpha \sin^2\vartheta}.$$

Zur Bestimmung von α und ϑ hat man also die beiden Gleichungen

$$\tang \lambda = - \tang \alpha \sin \vartheta$$

$$\cos^2 \mu = \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \sin^2 \vartheta,$$

woraus folgt

$$\cos \alpha = \cos \mu \cos \lambda$$

$$\sin \vartheta = \mp \frac{\cos \mu \sin \lambda}{\sqrt{1 - \cos^2 \mu \cos^2 \lambda}}$$

oder

$$\tang \vartheta = \sin \lambda \cotang \mu.$$

Wenn wir diese Werthe in 4b) und 4c) setzen, erhalten wir

$$\left.\begin{aligned} \tang k &= -\frac{\sin \mu \sin \lambda}{\cos \mu + \cos \lambda} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ 4\text{d})$$

$$\tang \frac{k}{2} = - \tang \left(\frac{\mu}{2}\right) \cdot \tang \left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

$$\tang k' = \frac{\sin \mu \cos \mu \sin \lambda (1 - \cos \mu \cos \lambda)}{\sin^2 \mu + \cos^3 \mu \sin^2 \lambda \cos \lambda}.$$

Nach einer ähnlichen Methode findet man

$$\tang k = - \frac{\sin m \cos m \sin l (1 - \cos m \cos l)}{\sin^2 m + \cos^3 m \sin^2 l \cos l}$$

$$\tang k' = \frac{\sin m \sin l}{\cos m + \cos l} \quad \ldots\ldots\ 4\text{e}).$$

Wann die hier gebrauchten Winkel positiv, wann negativ zu nehmen sind, ist oben festgesetzt worden.

Wenn man statt der Winkel k, μ, λ und k', m, l ihre Hälften in die Gleichungen 4d) und 4e) einführt, bekommen diese die zur logarithmischen Rechnung bequemere Gestalt

$$\left.\begin{aligned} \tang \left(\frac{k}{2}\right) &= - \tang \left(\frac{\mu}{2}\right) \cdot \tang \left(\frac{\lambda}{2}\right) \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ 4\text{f})$$

$$\tang \left(\frac{k^1}{2}\right) = \tang \left(\frac{m}{2}\right) \cdot \tang \left(\frac{l}{2}\right).$$

Ableitung des Drehungsgesetzes aus dem Principe der leichtesten Orientirung. Wir haben zunächst die Unterschiede der Raddrehung zu berechnen, welche dadurch entstehen, dass die Drehungen um andere Drehungsaxen ausgeführt werden, als um solche, die zur atropen Linie senkrecht sind. Es sei in *Fig. 164* ab die Gesichtslinie, ad die Drehungsaxe, um welche das Auge gedreht wird, wobei die Gesichtslinie ab den unendlich kleinen Bogen ds senkrecht zur Ebene der Zeichnung zurücklegen möge, so kann die Drehung um ad, deren Winkelgrösse wir mit Δ bezeichnen wollen, angesehen werden als resultirend aus einer Drehung

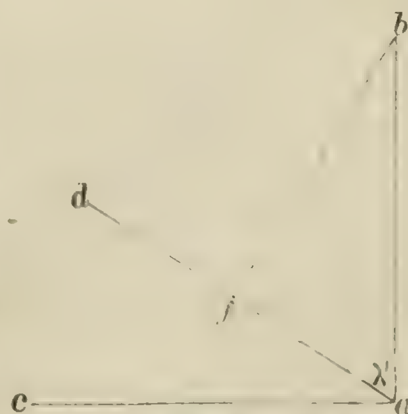


Fig. 164.

um die zu ab senkrechte Axe ac, und einer Drehung um ab selbst. Die Grösse der letzteren wird sein müssen gleich $\Delta \cos\lambda_1$, wenn wir den Winkel dab, wie in der Figur geschehen ist, mit λ_1 bezeichnen. Nun ist aber die Grösse von Δ dadurch bestimmt, dass ab sich um den Bogen ds fortbewegen soll. Für die Bewegung des Punktes b ist hierbei das von b auf die Drehungsaxe gefällte Loth bf der Radius Vector, also

$$ab \cdot ds = fb \cdot \Delta$$

oder

$$ds = \Delta \sin\lambda_1.$$

Die Raddrehung um die Linie ab wird also bei dieser Bewegung gleich

$$ds \text{ cotang } \lambda'.$$

Denken wir uns nun durch ab Ebenen gelegt nach verschiedenen Richtungen hin, so kann das Element ds in jede dieser Ebenen verlegt werden, und die zugehörigen Drehungsaxen müssen, wenn die Bewegungen des Auges von ab aus continuirlich ineinander übergehen sollen, in einer Ebene liegen. Eine der durch ab gelegten Ebenen muss senkrecht stehen auf der Ebene der Drehungsaxen, in welcher ad liegt. Für diese Ebene nehme der Winkel λ_1 den Werth λ an, und es sei ε der Winkel, welchen die durch das Bogenelement ds und die Gesichtslinie ab gelegte Ebene mit jener Ebene des Winkels λ macht. Eine bekannte Formel der sphärischen Trigonometrie ergiebt in der rechtwinkeligen dreikantigen Ecke, welche von der Ebene der Drehungsaxen und von den Ebenen der Winkel λ und λ_1 gebildet wird,

$$\text{cotg } \lambda' = \text{cotg } \lambda \cdot \cos\varepsilon$$

und die Drehung um die Linie ab wird also

$$ds \text{ cotg } \lambda' = ds \cdot \text{cotg } \lambda \cdot \cos\varepsilon.$$

Wenn nun die Blicklinie ab in der gleichen Stellung den Winkel μ mit der Ebene bildet, die zur atropen Linie normal ist, und $\varkappa$ der Winkel zwischen den beiden durch ab gelegten Ebenen der Winkel μ und λ ist, so würde eine Rechnung ähnlicher Art, wie die eben gemachte, ergeben, dass die Drehung um die Gesichtslinie gleich sein müsste

$$ds \text{ cotg } \mu \cos(\varepsilon - \varkappa),$$

wenn die Drehungen den Forderungen des Gesetzes der leichtesten Orientirung überall folgen könnten, wonach die Drehungsaxen stets senkrecht zur atropen Linie bleiben würden.

Das Quadrat des Unterschiedes ϱ zwischen der geforderten und der wirklichen Drehung ist

$$\varrho^2 = ds^2 \{\text{cotg } \lambda \cos\varepsilon - \text{cotg } \mu \cos(\varepsilon - \varkappa)\}^2.$$

Die Forderung des Princips der leichtesten Orientirung geht also dahin, dass die Summe aller Werthe von ϱ^2 für alle unendlich kleinen Bewegungen der Blicklinie von der Ausdehnung ds, welche im Blickfelde möglich sind, ein Minimum sei.

Nehmen wir zuerst die Summe aller Werthe von ϱ^2 für Verschiebungen ds, welche von ein und derselben Stellung der Blicklinie nach verschiedenen Richtungen hin, also mit verschiedenen Werthen des Winkels ε ausgehen. Wir haben

$$\int_0^{2\pi} \varrho^2 d\varepsilon = \pi ds^2 \{\text{cotg}^2\lambda + \text{cotg}^2\mu - 2 \text{ cotg } \lambda \cdot \text{cotg } \mu \cdot \cos\varkappa\} \quad \ldots \quad 5).$$

Dieser Ausdruck ist nun weiter zu summiren für alle verschiedenen Stellungen der Blicklinie im Blickfelde, welche gegeben sind durch die Winkel α und ϑ. Also es ist zu bilden das Integral

$$\int_0^{2\pi} d\vartheta \int_0^{\alpha_0} d\alpha \int_0^{2\pi} d\varepsilon \cdot \varrho^2 \sin\alpha = R \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 5a),$$

worin α_0 die Werthe bezeichnet, welche der Grenze des Blickfeldes entsprechen.

Um diese Integration auszuführen, müssen die Werthe von λ und $\varkappa$ gefunden werden, welche den einzelnen Werthen von α und ϑ entsprechen. Zu diesem Ende differenzire man die Gleichungen 1 c) nach α und ϑ, indem man den Winkel ω als Function der beiden ersteren Winkel ansieht, und ξ, υ, ζ als Constanten. Für die Punkte der Drehungsaxe muss

$$dx = dy = dz = 0$$

werden. Dann bilde man hieraus die ebenfalls für die Punkte der Drehungsaxe geltenden Gleichungen:

$$\left.\begin{aligned} a\,dx + a_{,}\,dy + a_{,,}\,dz &= 0 \\ b\,dx + b_{,}\,dy + b_{,,}\,dz &= 0 \\ c\,dx + c_{,}\,dy + c_{,,}\,dz &= 0 \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 6),$$

wo die Grössen a, b, c u. s. w. die Coefficienten der Gleichungen 1 c) bezeichnen

$$\begin{aligned} a &= \cos\alpha \\ a_{,} &= \sin\alpha \cos\vartheta \\ a_{,,} &= -\sin\alpha \sin\vartheta \\ b &= -\cos\omega \sin\alpha \\ b_{,} &= \cos\alpha \cos\vartheta \cos\omega - \sin\vartheta \sin\omega \\ b_{,,} &= -\cos\alpha \sin\vartheta \cos\omega - \cos\vartheta \sin\omega \\ c &= -\sin\omega \sin\alpha \\ c_{,} &= \cos\alpha \cos\vartheta \sin\omega + \sin\vartheta \cos\omega \\ c_{,,} &= -\cos\alpha \sin\vartheta \sin\omega + \cos\vartheta \cos\omega. \end{aligned}$$

Zwischen diesen Grössen finden bekanntlich Systeme von Gleichungen folgender Art statt

$$\left.\begin{aligned} 1 &= a^2 + a_{,}^2 + a_{,,}^2 \qquad & a b + a_{,}b_{,} + a_{,,}b_{,,} &= 0 \\ 1 &= b^2 + b_{,}^2 + b_{,,}^2 \qquad & a c + a_{,}c_{,} + a_{,,}c_{,,} &= 0 \\ 1 &= c^2 + c_{,}^2 + c_{,,}^2 \qquad & b c + b_{,}c_{,} + b_{,,}c_{,,} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \quad A)$$

$$\left.\begin{aligned} &0 = a\,da + a_{,}\,da_{,} + a_{,,}\,da_{,,} \\ &a\,db + a_{,}\,db_{,} + a_{,,}\,db_{,,} = -(b\,da + b_{,}\,da_{,} + b_{,,}\,da_{,,}) \\ &0 = b\;db + b_{,}db_{,} + b_{,,}\,db_{,,} \\ &a\,dc + a_{,}\,dc_{,} + a_{,,}\,dc_{,,} = -(c\,da + c_{,}da_{,} + c_{,,}da_{,,}) \\ &0 = c\;dc + c_{,}\,dc_{,} + c_{,,}\,dc_{,,} \\ &b\,dc + b_{,}\,dc_{,} + b_{,,}\,dc_{,,} = -(c\,db + c_{,}\,db_{,} + c_{,,}\,db_{,,}) \end{aligned}\right\} \; . \; . \; B).$$

Setzt man nun in den Gleichungen 6) statt dx, dy, dz ihre Werthe

$$dx = \xi da + v db + \zeta dc$$
$$dy = \xi da_{,} + v db_{,} + \zeta dc_{,}$$
$$dz = \xi da_{,,} + v db_{,,} + \zeta dc_{,,}$$

so erhält man

$$\left.\begin{aligned} 0 &= v\,(a db + a_{,} db_{,} + a_{,,} db_{,,}) + \zeta\,(a dc + a_{,} dc_{,} + a_{,,} dc_{,,}) \\ 0 &= \xi\,(b da + b_{,} da_{,} + b_{,,} da_{,,}) + \zeta\,(b dc + b_{,} dc_{,} + b_{,,} dc_{,,}) \\ 0 &= \xi\,(c da + c_{,} da_{,} + c_{,,} da_{,,}) + v\,(c db + c_{,} db_{,} + c_{,,} db_{,,}) \end{aligned}\right\} \ldots 6\text{a}).$$

Diese letzteren drei Gleichungen [1] geben jede der Coordinaten der Drehungsaxe durch jede andere ausgedrückt.

Für eine zur Ebene der Drehungsaxen normale Linie sei $\frac{\pi}{2} - \lambda$ der Winkel, den sie mit der ξ Axe (Blicklinie) bildet, und $\varkappa$ der Winkel, den die Ebene des Winkels λ mit der Ebene der $v\xi$ macht, entsprechend der Bezeichnung in Gleichung 5) und unter der Annahme, dass die Ebene der $v\xi$ durch die atrope Linie gelegt sei, dann ist für die Ebene der Drehungsaxen

$$\xi \sin\lambda + v \cos\lambda \cos\varkappa + \zeta \sin\lambda \sin\varkappa = 0$$

oder wenn man die Werthe von v und ζ aus den beiden letzten Gleichungen 6 a) nimmt und mit

$$(b dc + b_{,} dc_{,} + b_{,,} dc_{,,}) = -(c db + c_{,} db_{,} = c_{,,} db_{,,})$$

multiplicirt, so erhält man

$$\left.\begin{aligned} 0 = \sin\lambda\,(b dc + b_{,} dc_{,} + b_{,,} dc_{,,}) &- \cos\lambda \cos\varkappa\,(c da + c_{,} da_{,} + c_{,,} da_{,,}) \\ &+ \cos\lambda \sin\varkappa\,(b da + b_{,} da_{,} + b_{,,} da_{,,}) \end{aligned}\right\} \ldots 6\text{b}).$$

Diese Gleichung zerfällt nun in zwei, wenn $d\alpha$ und $d\vartheta$ unabhängig von einander sind, da jedes der Differentiale die Form hat

$$da = \frac{da}{d\alpha} d\alpha + \frac{da}{d\vartheta} d\vartheta.$$

Werden also die Differentiale in 6 b) ausgeführt, und erst nach α genommen, und dann nach ϑ, so erhält man folgende zwei Gleichungen:

---

[1] Es ist leicht zu sehen bei Berücksichtigung der Gleichungen B), dass die dritte dieser Gleichungen identisch aus den beiden ersten folgt. Wenn nun das ω der Gleichungen 1 c) eine continuirliche Function von α und ϑ ist, also

$$d\omega = \frac{d\omega}{d\alpha} d\alpha + \frac{d\omega}{d\vartheta} d\vartheta,$$

so werden die Differentiale da, db, dc etc. alle von der Form

$$da = \frac{da}{d\alpha} d\alpha + \frac{da}{d\vartheta} d\vartheta.$$

Eliminirt man nun aus zweien der Gleichungen 6 a) das Verhältniss $\frac{d\alpha}{d\vartheta}$, so behält man eine durch ζ theilbare, und nach der Division in Bezug auf ξ, v, ζ lineare Gleichung zurück, die Gleichung einer Ebene, in der alle Drehungsaxen für unendlich kleine Drehungen aus der gegebenen Stellung des Auges liegen müssen. Darin liegt der Beweis des früher angeführten Hilfsatzes, dass bei continuirlichen Bewegungen des Auges und unendlich kleinen Drehungen jeder Stellung eine Ebene der Drehungsaxen zukommt.

$$0 = \sin\lambda \frac{d\omega}{d\alpha} - \cos\lambda \cos\varkappa \sin\omega + \cos\lambda \sin\varkappa \cos\omega$$

$$0 = \sin\lambda \left(\frac{d\omega}{d\vartheta} + \cos\alpha\right) + \cos\lambda \cos\varkappa \sin\alpha \cos\omega + \cos\lambda \sin\varkappa \sin\alpha \sin\omega.$$

Durch Elimination von $\cos\varkappa$ oder $\sin\varkappa$ erhält man aus den beiden letzten Gleichungen:

$$\sin\lambda \left(\sin\alpha \sin\omega \frac{d\omega}{d\alpha} - \cos\omega \frac{d\omega}{d\vartheta} - \cos\omega \cos\alpha\right) = \cos\lambda \cos\varkappa \sin\alpha$$

$$\sin\lambda \left(\sin\alpha \cos\omega \frac{d\omega}{d\alpha} + \sin\omega \frac{d\omega}{d\vartheta} + \sin\omega \cos\alpha\right) = -\cos\lambda \sin\varkappa \sin\alpha.$$

Dividiren wir beide Gleichungen durch $\sin\lambda \sin\alpha$, so giebt die erstere den Werth von $\operatorname{cotg}\lambda \cos\varkappa$, den wir zur Substitution in 5) brauchen, und beide quadrirt und addirt, geben:

$$\operatorname{cotg}^2\lambda = \left(\frac{d\omega}{d\alpha}\right)^2 + \frac{1}{\sin^2\alpha}\left(\frac{d\omega}{d\vartheta} + \cos a\right)^2$$

und wir erhalten endlich den Werth von dem Integral R, welches ein Minimum werden soll

$$\left.\begin{aligned} R = \pi d s^2 \int_0^{2\pi} d\vartheta \int_\theta^{\alpha_0} d\alpha \Big\{ \sin\alpha \left(\frac{d\omega}{d\alpha}\right)^2 \\ + \frac{1}{\sin\alpha}\left(\frac{d\omega}{d\vartheta} + \cos\alpha\right)^2 - 2\operatorname{cotg}\mu \left[\sin\alpha \sin\omega \frac{d\omega}{d\alpha} - \cos\omega \left(\frac{d\omega}{d\vartheta} + \cos\alpha\right)\right] \\ + \operatorname{cotg}^2\mu \sin\alpha \Big\} \end{aligned}\right\} \text{6c).}$$

Veränderlich ist in diesem Ausdrucke ω und μ. Damit R ein Minimum werde, sind die Variationen nach beiden Grössen gleich Null zu setzen. Also

$$\left.\begin{aligned} 0 = \int_0^{2\pi} d\vartheta \int_0^{\alpha_0} d\alpha \Big\{ \sin\alpha \frac{d\omega}{d\alpha} \cdot \frac{d\delta\omega}{d\alpha} + \frac{1}{\sin\alpha}\left(\frac{d\omega}{d\vartheta} + \cos\alpha\right)\frac{d\delta\omega}{d\vartheta} \\ - \operatorname{cotg.}\mu \left[\left[\sin\alpha \cos\omega \frac{d\omega}{d\alpha} + \sin\omega \left(\frac{d\omega}{d\alpha} + \cos\alpha\right)\right]\delta\omega \right. \\ \left. + \sin\alpha \sin\omega \frac{d\delta\omega}{d\alpha} - \cos\omega \frac{d\delta\omega}{d\vartheta}\right]\Big\} \end{aligned}\right\} \ldots \text{6 d)}$$

und

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{cotg}\mu \int_0^{2\pi} d\vartheta \int_0^{\alpha_0} \sin\alpha \, d\alpha \\ = \int_0^{2\pi} d\vartheta \int_0^{\alpha_0} d\alpha \left[\sin\alpha \sin\omega \frac{d\omega}{d\alpha} - \cos\omega \left(\frac{d\omega}{d\vartheta} + \cos\alpha\right)\right] \end{aligned}\right\} \ldots \text{6 e).}$$

Aus der Gleichung 6 d) kann man durch partielle Integration die Grössen $\frac{d\delta\omega}{d\alpha}$ und $\frac{d\delta\omega}{d\vartheta}$ entfernen, und erhält dann zwei Integrale, eines nach dem Umfange des

Blickfeldes, eines über seine Fläche ausgedehnt, die nur noch $\delta\omega$ als Factor unter dem Integrationszeichen enthalten. Ehe man dies aber ausführt, ist danach zu sehen, dass die zu integrirende Function nicht mehrdeutig oder discontinuirlich werde im Innern des Blickfeldes. Nun ist schon oben bemerkt worden, dass für sehr kleine Werthe von α rings um die Anfangsstellung des Auges die Grösse $\omega + \vartheta$ gleich Null sein muss. Nun wächst aber ϑ von o bis 2π, wenn man die Blicklinie einmal um die Anfangsstellung einen unendlich kleinen Kreis beschreiben lässt, also muss dabei ω von o bis -2π sich verändern, und in der Nähe der Anfangsstellung discontinuirlich sein. Es ist deshalb besser eine andere Variable

$$\eta = \omega + \vartheta$$

einzuführen, welche überall im Blickfelde continuirlich sein kann. Dann ist

$$\frac{d\omega}{d\alpha} = \frac{d\eta}{d\alpha} \text{ und } \frac{d\omega}{d\vartheta} = \frac{d\eta}{d\vartheta} - 1$$

$$\delta\omega = \delta\eta.$$

Wenn wir nach dieser Substitution die partielle Integration der Gleichung 6 d) ausführen, um $\frac{d\,\delta\eta}{d\alpha}$ und $\frac{d\,\delta\eta}{d\vartheta}$ wegzuschaffen, so haben wir nachher den Principien der Variationsrechnung gemäss in beiden Integralen, dem nach dem Umfange sowohl, wie in dem nach der Fläche, die Factoren gleich Null zu setzen, welche mit $\delta\eta$ multiplicirt sind, und erhalten

1) für den Umfang, indem wir ihn in Richtung der wachsenden ϑ durchlaufen denken:

$$\left.\begin{aligned} 0 = \sin\alpha \frac{d\eta}{d\alpha} d\vartheta - \left(\frac{d\eta}{d\vartheta} - 1 + \cos\alpha\right)\frac{d\alpha}{\sin\alpha} \\ - \operatorname{cotg}\mu \left[\sin\alpha \cdot \sin(\eta - \vartheta)\, d\vartheta + \cos(\eta - \vartheta)\, d\alpha\right] \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 7),$$

2) für die Fläche des Blickfeldes

$$0 = \frac{d}{d\alpha}\left(\sin\alpha \frac{d\eta}{d\alpha}\right) + \frac{1}{\sin\alpha}\frac{d^2\eta}{d\vartheta^2}\Big\} \quad \ldots\ldots \quad 7\text{a}),$$

wozu endlich noch kommt die Gleichung 6 e), welche ebenfalls eine einmalige Integration zulässt

$$\operatorname{cotg}\mu \int_0^{2\pi} (1 - \cos\alpha)\, d\vartheta = \int [-\sin\alpha \cos(\eta - \vartheta)\, d\vartheta + \sin(\eta - \vartheta)\, d\alpha] \Big\} \; 7\text{b}),$$

welche beide Integrale über den ganzen Umfang zu nehmen sind. Das Integral links, welches mit $\operatorname{cotg}\mu$ multiplicirt ist, ist bekanntlich der Flächeninhalt des Blickfeldes. Um diese Gleichungen zu vereinfachen, führen wir statt α eine andere Variable ein, nämlich

$$\beta = \text{log. nat. tang} \frac{\alpha}{2},$$

so dass wird

$$e^{\beta} = \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} \qquad \frac{2e^{\beta}}{1+e^{2\beta}} = \sin\alpha$$

$$d\beta = \frac{d\alpha}{\sin\alpha} \qquad \frac{1-e^{2\beta}}{1+e^{2\beta}} = \cos\alpha$$

und wenn ψ eine beliebige Function von α ist, so ist

$$\frac{d\psi}{d\beta} = \frac{d\psi}{d\alpha}\sin\alpha.$$

Substituirt man diese Werthe in 7a), so erhält man folgende Gleichung für das Innere des Feldes

$$\frac{d^2\eta}{d\beta^2} + \frac{d^2\eta}{d\vartheta^2} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7\text{c}),$$

dann aus 7) für den Umfang

$$\left.\begin{aligned} 0 = \frac{d\eta}{d\beta}d\vartheta - \left(\frac{d\eta}{d\vartheta} - \frac{2e^{2\beta}}{1+e^{2\beta}}\right)d\beta \\ - \operatorname{cotg}\mu \cdot \frac{2e^{\beta}}{1+e^{2\beta}}\Big[\sin(\eta-\vartheta)\,d\vartheta \\ + \cos(\eta-\vartheta)\,d\beta\Big] \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 7\text{d})$$

und endlich aus 7b)

$$\operatorname{cotg}\mu\int\frac{2e^{2\beta}}{1+e^{2\beta}}\,d\vartheta = \int\frac{2e^{\beta}}{1+e^{2\beta}}\Big[\sin(\eta-\vartheta)\,d\beta - \cos(\eta-\vartheta)\,d\vartheta\Big] \quad \ldots 7\text{e}).$$

Es ist bekannt, dass alle reellen Integrale der Gleichung 7c) dargestellt werden können als der reelle Theil irgend einer beliebigen Function ψ von der complexen Grösse $\beta + \vartheta i$. Wenn gesetzt wird

$$\psi = \varphi + \chi i \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8),$$

wo φ und χ reell sind, so kann sowohl φ als χ Integral der Gleichung 7c) sein.

Soll φ ein für unsere Zwecke passendes Integral sein, so muss es erstens innerhalb des Blickfeldes überall endlich und eindeutig sein, auch für $\alpha = 0$ oder $\beta = -\infty$. Zweitens muss es auch noch längs des Randes des Blickfeldes den Gleichungen 7d) und 7e) genügen.

Aus der Gleichung 8) folgt, wenn wir das Differential von ψ nach der complexen Variablen $\beta + \vartheta i$ mit ψ' bezeichnen

$$\frac{d\psi}{d\beta} = \psi' = \frac{d\varphi}{d\beta} + i\frac{d\chi}{d\beta}$$

$$\frac{d\psi}{d\vartheta} = i\psi' = \frac{d\varphi}{d\vartheta} + i\frac{d\chi}{d\vartheta},$$

also wenn man ψ' eliminirt,

$$0 = i\frac{d\varphi}{d\beta} - \frac{d\chi}{d\beta} - \frac{d\varphi}{d\vartheta} - i\frac{d\chi}{d\vartheta}$$

oder

$$\left.\begin{aligned}\frac{d\chi}{d\beta} + \frac{d\varphi}{d\vartheta} &= 0\\ \frac{d\chi}{d\vartheta} - \frac{d\varphi}{d\beta} &= 0\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 8\,a).$$

Setzt man ferner

$$Y = Y_0 + iY_1 = e^{\chi - \varphi i + \beta + \vartheta i},$$

so ist auch diese Grösse eine Function von $\beta + \vartheta i$, und folglich

$$\left.\begin{aligned}\frac{dY_0}{d\vartheta} + \frac{dY_1}{d\beta} &= 0\\ \frac{dY_0}{d\beta} - \frac{dY_1}{d\vartheta} &= 0\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 8\,b)$$

und

$$\left.\begin{aligned}Y_0 &= e^{\chi} e^{\beta} \cos(\varphi - \vartheta)\\ Y_1 &= -\, e^{\chi} e^{\beta} \sin(\varphi - \vartheta)\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 8\,c).$$

Wenn wir nun in Gleichung 7 d) die Grösse φ für η substituiren, und die Gleichung multipliciren mit dem Factor

$$e^{\sigma} = e^{\chi}(1 + e^{2\beta}),$$

wobei wir setzen

$$\sigma = \chi + \text{log. nat. } (1 + e^{2\beta}),$$

so erhalten wir mit Berücksichtigung der Gleichungen 8 a) und 8 c)

$$0 = e^{\sigma} \frac{d\sigma}{d\vartheta} d\vartheta + e^{\sigma} \frac{d\sigma}{d\beta} d\beta + 2 \operatorname{cotg} \mu \left[Y_1 d\vartheta - Y_0 d\beta \right] \quad \ldots\ldots 8\,d).$$

Diese Gleichung ist ein vollständiges Differential, da nach 8 b)

$$\frac{dY_1}{d\beta} = \frac{d}{d\vartheta}\left(-Y_0\right).$$

In der That, wenn wir die Function Y nach der complexen Variablen $\beta + \vartheta i$ integriren, und das Integral ist

$$\Phi = \Phi_0 + i\Phi_1,$$

so haben wir

$$\Phi' = Y$$

oder

$$\frac{d\Phi_0}{d\beta} + i \frac{d\Phi_1}{d\beta} = Y_0 + iY_1$$

$$\frac{d\Phi_0}{d\vartheta} + i \frac{d\Phi_1}{d\vartheta} = iY_0 - Y_1,$$

also

$$Y_0 = \frac{d\Phi_0}{d\beta} = \frac{d\Phi_1}{d\vartheta}$$

$$Y_1 = \frac{d\Phi_1}{d\beta} = -\frac{d\Phi_0}{d\vartheta}.$$

Die Gleichung 8d) integrirt, giebt also für den Umfang des Feldes

$$C = e^{\sigma} - 2 \operatorname{cotg} \mu \cdot \Phi_0 \Big\} \quad \ldots \ldots \quad 8e)$$

oder

$$\sigma = \chi + \log. \text{nat.} (1 + e^{2\beta}) = \log. \text{nat.} [C + 2 \operatorname{cotg} \mu \cdot \Phi_0] \Big\} \ldots 8f).$$

Die Constanten C und μ müssen aber auch schliesslich der Gleichung 7e) genügen, wenn μ derjenige Winkel sein soll, welcher den Forderungen des Princips der leichtesten Orientirung am besten entspricht.

Nun lässt sich zeigen, dass der Werth $\operatorname{cotg} \mu = 0$ der Gleichung 8f) und 7e) zugleich entspricht. Denn es ist das über den ganzen Umfang des Feldes genommene Integral

$$\int Y_0 \, d\vartheta + Y_1 \, d\beta = \int \frac{d\Phi_1}{d\vartheta} \, d\vartheta + \frac{d\Phi_1}{d\beta} \, d\beta = 0,$$

wenn, wie aus der über φ gemachten Annahme folgt, auch Φ_1 überall endlich und eindeutig ist, weil dies Integral gleich der Differenz der Werthe von Φ_1 ist, die diese Grösse in demselben Punkte der Peripherie vor und nach einem Umlauf um deren ganze Länge annimmt. Setzen wir statt der Grössen Y_0 und Y_1 ihre Werthe aus 8c), so haben wir

$$0 = \int \frac{e^{\sigma} \cdot e^{\beta}}{1 + e^{2\beta}} \Big[\cos(\varphi - \vartheta) \, d\vartheta - \sin(\varphi - \vartheta) \, d\beta \Big].$$

Wenn nun $\operatorname{cotg} \mu = 0$ gesetzt wird, so folgt aus 8f), dass die Grösse σ längs des ganzen Umfanges constant wird, und daher der Factor e^{σ} vor das Integrationszeichen gesetzt werden kann, und dass wir unter der Voraussetzung $\operatorname{cotg} \mu = 0$ haben

$$0 = \int \frac{e^{\beta}}{1 + e^{2\beta}} \Big[\cos(\varphi - \vartheta) \, d\vartheta - \sin(\varphi - \vartheta) \, d\beta \Big],$$

woraus folgt, dass die Gleichung 7e) unter der gemachten Annahme erfüllt ist.

Die Frage, ob noch andere Werthe als der $\operatorname{cotg} \mu = 0$ den Bedingungen der Aufgabe genügen würden, lässt sich, so viel ich sehe, noch nicht für eine jede beliebig gegebene Form des Blickfeldes lösen. Da aber das wirkliche Blickfeld der Kreisform ziemlich nahe kommt, so wird es hier genügen, wenn ich noch den Beweis führe, dass für die Kreisform kein anderer reeller Werth existirt, als $\mu = 0$.

Das Drehungsgesetz für ein kreisförmiges Blickfeld. Da die zu suchende Function η der reelle Theil einer beliebigen Function von $\beta + \vartheta i$ sein soll, welche für keinen Punkt des Blickfeldes unendlich oder mehrdeutig wird, auch nicht für $\beta = -\infty$, so wird sie im Allgemeinen von der Form sein müssen

$$\left.\begin{aligned} \eta = A_0 + A_1 e^{\beta} \cos(\vartheta + c_1) + A_2 e^{2\beta} \cos(2\vartheta + c_2) \\ + A_3 e^{3\beta} \cos(3\vartheta + c_3) + \text{etc.} \end{aligned}\right\} \quad \ldots 9),$$

wo die Grössen A und c beliebige willkührliche Constanten bezeichnen. Das zugehörige χ wird dann sein

$$\left.\begin{aligned} \chi = A_1 e^{\beta} \sin(\vartheta + c_1) + A_2 e^{2\beta} \sin(2\vartheta + c_2) \\ + A_3 e^{3\beta} \sin(3\vartheta + c_3) + \text{etc.} \end{aligned}\right\} \quad \ldots 9a)$$

und wenn $\operatorname{cotg}\mu = 0$ ist, so wird die Gleichung der Umfangslinie:

$$\chi = \text{log. nat.} \frac{C}{1 + e^{2\beta}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9\text{b}).$$

Die in allen diesen Gleichungen vorkommende Grösse e^β ist gleich $\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}$. Kann man also die Gleichung zwischen α und ϑ, welche die Linie des Umfangs bestimmt, in die Form 9b) bringen, so ist dadurch die Aufgabe gelöst, indem man von χ aus immer leicht den Winkel η finden kann, der die Abweichung vom Listing'schen Gesetze misst.

Wir wollen jetzt untersuchen, welche Gestalt das Feld annimmt unter der Annahme, dass η constant sei, oder da die absolute Grösse des ihm beigelegten Werthes ganz gleichgültig ist, wenn

$$\eta = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10).$$

Dagegen wollen wir den Werth von $\operatorname{cotg}\mu$ unbestimmt lassen.

Aus der Annahme 10) folgt, dass auch $\chi = 0$ sei, und die Grössen Y der Gleichungen 8c) werden

$$Y_0 = e^\beta \cos\vartheta$$

$$Y_1 = e^\beta \sin\vartheta$$

$$Y_0 + Y_1 i = e^{\beta + \vartheta i} = \Phi_0 + \Phi_1 i.$$

Die Gleichung des Umfangs 8f) wird also

$$1 + e^{2\beta} = C + 2e^\beta \cos\vartheta \cdot \operatorname{cotg}\mu.$$

Setzen wir statt e^β seinen Werth $\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}$, so lässt sich diese Gleichung schreiben

$$\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} + (1 - C)\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} = 2\cos\vartheta \cdot \operatorname{cotg}\mu \quad \ldots \quad 10\text{a}).$$

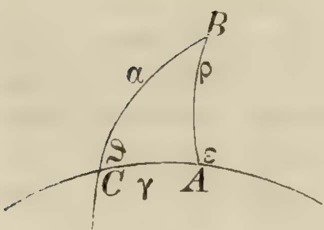


Fig. 165.

Dies ist die Gleichung eines Kreises. Denn in nebenstehendem sphärischen Dreiecke der *Fig. 165* ist nach einer bekannten Formel

$$\cos\varrho = \cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \cdot \cos\vartheta$$

oder wenn wir darin $\sin\alpha$ und $\cos\alpha$ durch $\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}$ ausdrücken:

$$\cos\varrho\left(1 + \operatorname{tang}^2\frac{\alpha}{2}\right) = \cos\gamma\left(1 - \operatorname{tang}^2\frac{\alpha}{2}\right) + 2\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} \cdot \sin\gamma\cos\vartheta$$

oder

$$(\cos\varrho + \cos\gamma)\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} + (\cos\varrho - \cos\gamma)\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} = 2\sin\gamma\cos\vartheta \quad \ldots 10\text{b}).$$

Setzen wir also

$$\frac{\cos\varrho - \cos\gamma}{\cos\varrho + \cos\gamma} = 1 - C \quad \text{und} \quad \frac{\sin\gamma}{\cos\varrho + \cos\gamma} = \operatorname{cotg}\mu \quad \ldots \quad 10\text{c}),$$

so ist die Gleichung 10b) mit 10a) identisch, und aus den beiden letzten Gleichungen

ergiebt sich ein constanter Werth für ϱ, welches den Bogenabstand längs der Kugelfläche für den Punkt B am Umfange des Blickfeldes von dem Punkte A bezeichnet. Der Umfang des Blickfeldes ist also, wenn $\eta = 0$, ein Kreis, dessen Bogenradius ϱ und dessen Mittelpunkt A ist.

Die zweite Gleichung des Umfangs können wir in der Form 7 b) benutzen. Das eben dort links stehende Integral ist, wie schon oben bemerkt wurde, und wie seine Form in 6 e) am leichtesten erkennen lässt, der Flächeninhalt des Blickfeldes, der jetzt durch ϱ auszudrücken ist, so dass wir haben

$$2\pi \operatorname{cotg} \mu \cdot (1 - \cos \varrho) = -\int \left\{ \sin \alpha \cos \vartheta \, d\vartheta + \sin \vartheta \, d\alpha \right\} \quad \ldots 10\text{ d}).$$

Wenn wir nun für das sphärische Dreieck der *Fig. 165* die bekannten Formeln der sphärischen Trigonometrie

$$\cos \alpha = \cos \gamma \cos \varrho - \sin \gamma \sin \varrho \cos \varepsilon$$
$$\sin \vartheta \sin \alpha = \sin \varrho \sin \varepsilon$$

anwenden, und beide nach α und ϑ differentiiren, wobei ϱ als constant für den Umfang des Blickfeldes anzusehen ist; so haben wir längs dieses Umfanges

$$\cos \vartheta \sin \alpha \, d\vartheta + \sin \vartheta \cos \alpha \, d\alpha = \sin \varrho \cos \varepsilon \, d\varepsilon$$
$$\sin \alpha \, d\alpha = - \sin \gamma \sin \varrho \sin \varepsilon \, d\varepsilon$$

oder

$$\sin \vartheta \, d\alpha = - \frac{\sin \gamma \sin^2 \varrho \sin^2 \varepsilon \, d\varepsilon}{\sin^2 \alpha}.$$

Diese Werthe, in das Integral der Gleichung 10 d) gesetzt, ergeben:

$$2\pi \operatorname{cotg} \mu \, (1 - \cos \varrho)$$
$$= - \int_0^{2\pi} \frac{\sin \varrho \cos \varepsilon + \cos \gamma \cos \varrho \sin \varrho \cos \varepsilon - \sin \gamma \sin^2 \varrho}{1 + \cos \varrho \cos \gamma - \sin \gamma \sin \varrho \cos \varepsilon} \, d\varepsilon.$$

Setzen wir hierin zur Abkürzung

$$1 + \cos \gamma \cos \varrho = a$$
$$\sin \gamma \sin \varrho = b$$
$$\operatorname{tang} \frac{\varepsilon}{2} = x,$$

so können wir das Integral auf die Form bringen

$$2\pi \operatorname{cotg} \mu \, (1 - \cos \varrho)$$
$$= - \sin \varrho \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{a+b}{b} \frac{dx}{1 + \frac{a+b}{a-b} x^2} + \frac{a \sin \varrho}{b} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{1 + x^2}$$
$$= \frac{\pi \sin \varrho}{b} \left(a - \sqrt{a^2 - b^2}\right).$$

Drücken wir $\operatorname{cotg}\mu$, a und b wieder durch γ und ϱ aus, so erhalten wir

$$\frac{2 \sin\gamma\,(1 - \cos\varrho)}{\cos\varrho + \cos\gamma} = \frac{1}{\sin\gamma}\,(1 + \cos\gamma\cos\varrho - \cos\gamma - \cos\varrho)$$

oder

$$2 \sin^2\gamma\,(1 - \cos\varrho) = (\cos\varrho + \cos\gamma)\,[1 + \cos\gamma\cos\varrho - \cos\gamma - \cos\varrho] \} \ldots 10\,e),$$

wofür auch geschrieben werden kann:

$$(1 - \cos\gamma)\,(1 - \cos\varrho)\,\{2 + \cos\gamma - \cos\varrho\} = 0 \} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10\,f),$$

woraus folgt, dass der einzige reelle Werth von $\cos\gamma$, der diese Gleichung zu Null macht, ist

$$\cos\gamma = 1,$$

woraus folgt

$$\sin\gamma = 0 \quad \text{und} \quad \operatorname{cotg}\mu = 0.$$

Der zweite Werth von $\cos\gamma$, den die Gleichung 10f) giebt, würde kleiner als -1 sein, nämlich

$$\cos\gamma = \cos\varrho - 2$$

und also einem imaginären Bogen entsprechen.

Die vorliegende Rechnung [1] ist durchgeführt worden unter der Voraussetzung, dass Bewegungen des Auges in allen Theilen des Blickfeldes und nach allen Richtungen gleich häufig vorkommen, was der Wirklichkeit wohl nicht ganz entspricht, indem wir in der Regel die Blicklinie in den mittleren Theilen ihres Bewegungsfeldes zu halten pflegen. Die peripherischen Theile des Feldes werden deshalb im Allgemeinen weniger durchlaufen als die centralen, und werden deshalb auch einen geringeren Einfluss auf das Bewegungsgesetz haben müssen als die centralen. Diesen Umstand in der Rechnung zu berücksichtigen schien mir nutzlos, da wir seine Grösse doch nicht genau kennen, und da sich leicht übersehen lässt, welchen Einfluss er auf das Resultat haben wird. Aus der Gleichung 9), welche wir schreiben können

$$\eta = A_0 + A_1 \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\cos(\vartheta + c_1) + A_2 \operatorname{tang}^2\frac{\alpha}{2}\cdot\cos(2\vartheta + c_2)$$
$$+ A_3 \operatorname{tang}^3\frac{\alpha}{2}\cos(3\vartheta + c_3) \text{ etc.}$$

und in der wir den Anfangspunkt der Coordinaten noch so verändern können, dass das mit der ersten Potenz von $\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}$ behaftete Glied gleich Null wird, geht hervor, dass für kleine Werthe von α, η nahehin constant ist, und dass nur nach der Peripherie des Feldes hin, wo die Werthe von $\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}$ grösser werden, die Abweichungen vom LISTING'schen Gesetze merklich werden können. Wenn nun die peripherischen Theile des Blickfeldes überhaupt weniger Einfluss erhalten, so wird eben die Abweichung vom LISTING'schen Gesetze, welche durch eine nicht kreis-

---

[1] Sie ist hier weiter durchgeführt worden, als dies bei der ersten Veröffentlichung dieser Untersuchungen im Archiv für Ophthalmologie IX, 2, geschehen war. Dort war der Winkel μ zwischen der Blicklinie und der atropen Linie noch als fest gegeben betrachtet worden, und ausserdem als klein. Es ist mir erst später gelungen, den Beweis zu finden, dass die Consequenzen des zu Grunde gelegten Princips fordern, dass er gleich Null sei.

förmige Form des Feldes bedingt werden könnte, noch geringer werden müssen, als wenn die peripherischen Theile oft durchlaufen werden.

Ausserdem möchte es vielleicht nicht ganz richtig sein, dass in allen Theilen des Gesichtsfeldes Bewegungen des Blicks nach allen Richtungen hin gleich häufig sind. Wenigstens finde ich an mir selbst, dass ich Bewegungen, die der Peripherie des Blickfeldes parallel gehen, zu vermeiden suche, namentlich, wenn ich die Form und Ausdehnung der betreffenden Objecte deutlich zu erkennen wünsche. Ich habe dann den unwillkührlich wirkenden Trieb den Kopf so zu drehen, dass die betreffenden Bewegungen des Blicks in Meridiane des Blickfeldes fallen, die durch die Primärlage gehen. So kann ich an einer gerade vor mir liegenden Verticallinie mit dem Blicke hoch hinauflaufen ohne die Neigung den Kopf zu drehen; wenn ich aber an einer hoch gelegenen Horizontallinie entlang laufen will, so ist es mir natürlicher, den Kopf zu heben, bis ich sie in der Primärlage habe, als es mit gehobenen Augen zu thun.

Es scheinen mir also die Bewegungen des Auges bevorzugt zu sein, welche in Meridianen des Blickfeldes entlang laufen, die durch die Primärlage gehen. Dies sind auch die Bewegungen, bei denen keine Scheindrehung der Objecte stattfindet, und daher rührt auch wohl ihre Bevorzugung. Auch dieser Umstand muss dahin wirken, dass wenn einmal das Listing'sche Gesetz für die Bewegung eines individuellen Auges zur Geltung gekommen ist, die Neigung von dem Gesetze abzuweichen, wegen irgend welcher Unregelmässigkeiten des Blickfeldes geringer werden muss.

Herr E. Hering [1] hat noch hervorgehoben, dass das Auge wegen der Convergenz auf nahe Gegenstände relativ häufiger nach innen gerichtet ist, als nach aussen. Da wir nun aber, wie Volkmann experimentell gezeigt, und wir oben theoretisch zu begründen gesucht haben, die Parallelstellungen der Augen in Bezug auf das Bewegungsgesetz wenigstens kurzsichtiger Augen trennen müssen und trennen dürfen von den Convergenzstellungen, so fällt jener Umstand für das Gesetz der Raddrehung in Parallelstellungen ausser Betracht.

Dagegen ist allerdings zu beachten, dass wir Parallelstellungen hauptsächlich für die oberen Theile des Blickfeldes anwenden, weil mit seltenen Ausnahmen nur dort unendlich entfernte Gegenstände vorkommen, während wir im Gegentheil Convergenzstellungen fast nur für die unteren Theile des Feldes benutzen, wo der Fussboden, unsere Hände und die Objecte, die wir in den Händen haben, sich befinden. Wenn man versucht, zwei Punkte, die in der Distanz der Augen auf einem Blatt Papier gezeichnet sind, mit parallelen Gesichtslinien zu betrachten und dadurch zum Decken zu bringen, so ist dies viel schwerer bei gesenkter Visirebene, als bei gehobener, und umgekehrt ist das Convergiren auf einen nahen Punkt viel schwerer bei gehobener Visirebene, als bei gesenkter, und wir dürfen deshalb wohl erwarten, dass im Allgemeinen bei Convergenzstellungen der Augen die Abweichungen der Raddrehung von der der Parallelstellungen in dem Sinne geschehen werden, als ob die Primärlage der convergenten Augen nach innen und unten von der Primärlage der parallelen läge. Damit scheinen auch die bisher ausgeführten Beobachtungen übereinzustimmen.

Uebrigens halte ich es für wahrscheinlich, dass auch mancherlei Abweichungen durch angewöhnte Manieren in der Bewegung der Augen eintreten können, wie das bei einem Gesetze, welches wesentlich nur durch Einübung entstanden ist und durch Willkühr gebrochen werden kann, natürlich ist. Einen beträchtlichen Einfluss scheint auch die Kurzsichtigkeit zu haben, theils wohl wegen der vorzugsweise

---

[1] Beiträge zur Physiologie IV. S. 272.

gebrauchten Convergenzstellungen, theils wegen der Difformität des Augapfels, welche mechanische Schwierigkeiten hervorbringen kann. Ja selbst die Gewöhnung an Brillengläser, die vielleicht nicht ganz centrirt vor dem Auge stehen, kann Einfluss haben.

Ich will mir erlauben hier schliesslich noch auf eine Methode aufmerksam zu machen, welche die verwickelten und schwer übersichtlichen Rechnungen über die Lage der Punkte eines um einen Punkt gedrehten Körpers ausserordentlich vereinfacht und übersichtlich macht, wobei aber die Anwendung der complexen Coordinaten für die Punkte einer Ebene dem Leser geläufig sein muss.

Zur Uebertragung der Punkte einer Kugelfläche auf eine Ebene wende ich die für Landkarten gewöhnlich gebrauchte stereographische Projection an. Es sei AB (*Fig. 166*) die Ebene, auf welche projicirt werden soll, C der Mittelpunkt der Kugel, deren Oberfläche zu projiciren ist, CK das von diesem Mittelpunkte auf die Ebene AB gefällte Loth, welches verlängert die Kugelfläche in D schneidet, so denke ich mir ein Auge in D befindlich, und die Punkte der Kugelfläche auf diejenigen Punkte der Ebene übertragen, auf die sie sich für das in D befindliche Auge projiciren würden. Soll also der Punkt F der Kugelfläche projicirt werden, so ziehe ich die gerade DF, verlängere sie, bis sie in A die Ebene AB schneidet. A ist die Projection von F.

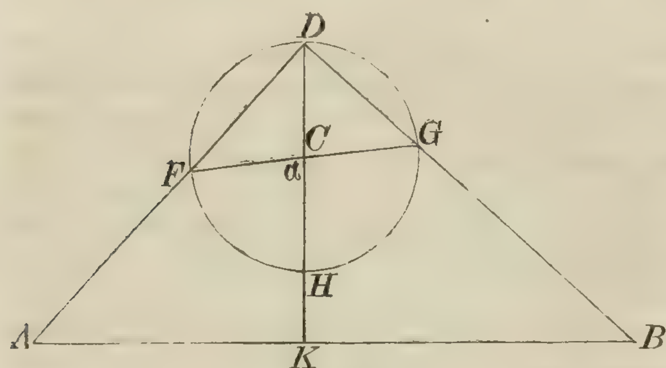


Fig. 166.

Es ist bekannt, dass bei einer solchen Projectionsweise die kleinsten Flächentheile der Zeichnung auf der Kugelfläche geometrisch ähnlich werden den entsprechenden Flächentheilen der Abbildung dieser Zeichnung auf der Ebene, wenn auch der Maassstab der Vergrösserung in den verschiedenen Theilen der ebenen Zeichnung verschieden ist. Alle Kreise auf der Kugelfläche werden wieder durch Kreise, beziehlich gerade Linien, welche als Kreise von unendlich grossem Radius angesehen werden können, dargestellt. Und zwar erscheinen als gerade Linien alle diejenigen Kreise der Kugeloberfläche, welche durch den Punkt D gehen, wie leicht einzusehen ist, wenn man sich die Ebene dieser Kreise construirt denkt, welche Ebene die Ebene AB in einer geraden Linie schneidet, die eben die Projection des betreffenden Kreises ist.

Grösste Kreise, welche durch den Punkt D gehen und deshalb sich als gerade Linien auf die Ebene projiciren, müssen auch durch den dem Punkte D diametral gegenüberstehenden Punkt H gehen, ihre Projection also durch den Fusspunkt des Lothes CK. Also die durch den Punkt K, den Mittelpunkt der ebenen Zeichnung, gehenden geraden Linien entsprechen grössten Kreisen.

Für die Punkte desjenigen grössten Kreises der Kugel, der der Ebene AB parallel ist, wird der Winkel FDK gleich einem halben Rechten, und die Entfernung AK deshalb gleich DK, welche Länge wir als die Längeneinheit betrachten wollen. Dieser Kreis projicirt sich also in die Ebene als ein Kreis vom Radius $= 1$ mit dem Mittelpunkte K.

Wir wollen ihn den Aequatorialkreis nennen.

Der Aequatorialkreis der Kugel wird von allen andern grössten Kreisen der Kugel in zwei diametral gegenüber liegenden Punkten geschnitten. Denen entsprechen auch in der Ebene zwei diametral gegenüber liegende Punkte des pro-

jicirten Aequatorialkreises. Daraus folgt, dass solche Kreise der Ebene grössten Kreisen der Kugel entsprechen, welche den Aequatorialkreis der Ebene in zwei diametral gegenüber liegenden Punkten schneiden.

Wenn der Punkt G dem Punkte F auf der Kugel diametral gegenüber liegt, so ist FDG ein rechter Winkel, und wenn B die Projection von G ist, so ist wegen Aehnlichkeit der rechtwinkeligen Dreiecke AKD und DKB

$$AK : DK = DK : KB$$

oder wenn wir, wie festgesetzt ist, DK zur Längeneinheit machen, so ist

$$AK = \frac{1}{KB}.$$

Die Entfernungen der Projectionen diametral auf der Kugel gegenüber liegender Punkte vom Mittelpunkte K sind also gegenseitig reciproke Grössen. Natürlich liegen die Projectionen solcher diametraler Punkte auch in einer durch den Mittelpunkt K der Zeichnung gehenden geraden Linie auf entgegengesetzten Seiten des Mittelpunkts.

Die Projection des dem Mittelpunkte K selbst diametral entgegenstehenden Punkts D der Kugel fällt in unendliche Entfernung.

Bezeichnen wir den Centriwinkel FCH mit a, so ist der auf gleichem Bogen stehende Peripheriewinkel FDH gleich $\frac{1}{2}a$, und also die Entfernung der Projection A des Punktes F vom Mittelpunkte K

$$AK = DK \cdot \operatorname{tang} \frac{a}{2}$$

oder da DK gleich Eins gesetzt worden ist,

$$AK = \operatorname{tang} \frac{a}{2}.$$

Betrachten wir nun wie früher den Mittelpunkt C der Kugel als Centrum eines Coordinatensystems ξ, v, ζ, dessen ξAxe die Normale CK sei, und dessen $v\zeta$Ebene also der Ebene AB parallel liegt. Der Winkel, den die Ebene der Zeichnung mit der ξvEbene macht, sei t und v der Radius der Kugel, so sind die Coordinaten des Punktes F

$$\xi = r \cos a$$

$$v = r \sin a \cos t = 2r \frac{\operatorname{tang} \frac{a}{2} \cdot \cos t}{1 + \operatorname{tang}^2 \frac{a}{2}}$$

$$\zeta = r \sin a \sin t = 2r \frac{\operatorname{tang} \frac{a}{2} \cdot \sin t}{1 + \operatorname{tang}^2 \frac{a}{2}}.$$

Und die Coordinaten des Punktes A, die wir mit ξ', v', ζ' bezeichnen wollen, sind

$$\xi' = 1 - r$$

$$v' = AK \cdot \cos t = \operatorname{tang} \frac{a}{2} \cdot \cos t$$

$$\zeta' = AK \cdot \sin t = \operatorname{tang} \frac{a}{2} \cdot \sin t.$$

Daraus folgt

$$v' = \frac{v}{2r \cos^2 \frac{\alpha}{2}} = \frac{v}{r + \xi}$$

$$\zeta' = \frac{\zeta}{2r \cos^2 \frac{a}{2}} = \frac{\zeta}{r + \xi}.$$

Wenn man nun v' und ζ' zu einer einzigen complexen Variablen vereinigt:

$$\varkappa = v' + i\zeta' = \frac{v + i\zeta}{r + \xi} = \operatorname{tang} \frac{a}{2} \cdot e^{it} \quad \ldots \quad 11),$$

wo

$$i = \sqrt{-1},$$

so entspricht jedem Werthe von $\varkappa$ ein Punkt der Ebene, und also auch ein Punkt der Kugelfläche.

Den Werth von $\varkappa$ für den diametral entgegenstehenden Punkt bezeichnen wir mit $\varkappa'$. Für diesen Punkt haben ξ, v, ζ gleiche Werthe, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen. Es ist also

$$\varkappa' = -\frac{v + i\zeta}{r - \xi} = -\frac{r + \xi}{v - i\zeta}$$

$$= -\frac{1}{v' - i\zeta'} = -\operatorname{cotg} \frac{a}{2} \cdot e^{it}.$$

So haben wir also

$$\left.\begin{array}{ll} \dfrac{v + i\zeta}{r + \xi} = \varkappa, & \dfrac{v - i\zeta}{r + \xi} = -\dfrac{1}{\varkappa'} \\ \dfrac{r - \xi}{r + \xi} = -\dfrac{\varkappa}{\varkappa'}, & \dfrac{2\xi}{r + \xi} = \dfrac{\varkappa' + \varkappa}{\varkappa'} \end{array}\right\} \quad \ldots \quad 11\text{ a}).$$

Nun wollen wir die entsprechenden Ausdrücke bilden für die durch Drehung um den Punkt C veränderte Lage der Kugel, deren Coordinaten x, y, z in den Gleichungen 1 c) auf Seite 488 gegeben sind. Nennen wir k den Werth, welchen $\varkappa$ nach der Drehung erhält, so haben wir entsprechend der Gleichung 11)

$$k = \frac{y + iz}{r + x}$$

$$= e^{-i\vartheta} \cdot \frac{\xi \cdot \sin \alpha + v\,(\cos \alpha \cdot \cos \omega - i \cdot \sin \omega) + \zeta\,(\cos \alpha \cdot \sin \omega + i \cdot \cos \omega)}{r + \xi \cdot \cos \alpha - v \cdot \cos \omega \cdot \sin \alpha - \zeta \cdot \sin \omega \cdot \sin \alpha}.$$

Indem man in dieser Gleichung $\sin\alpha$ und $\cos\alpha$ durch $\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}$ ausdrückt, kann man diesen Ausdruck auf die Form bringen:

$$k = e^{-i\vartheta}\,\frac{2\xi + (v + i\zeta)\,e^{-i\omega}\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} - (v - i\zeta)\,e^{+i\omega}\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}}{(r+\xi)\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} + (r-\xi)\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} - (v+i\zeta)\,e^{-i\omega} - (v-i\zeta)\,e^{i\omega}},$$

indem man Zähler und Nenner dieses Bruchs mit

$$\frac{\varkappa'}{r+\xi}$$

multiplicirt, erhält man mit Berücksichtigung der Gleichungen 11a)

$$k = \frac{\varkappa' + \varkappa + \varkappa\varkappa'\,e^{-i\omega}\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} + e^{i\omega}\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}}{\varkappa'\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} - \varkappa\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} - \varkappa'\varkappa\,e^{-i\omega} + e^{i\omega}}\,e^{-i\vartheta}$$

oder

$$k = e^{-i\vartheta}\operatorname{cotg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\frac{\left(\varkappa + e^{i\omega}\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\right)\left(\varkappa' + e^{i\omega}\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\right)}{\left(e^{i\omega} - \varkappa\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\right)\left(e^{i\omega} + \varkappa'\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2}\right)}$$

oder da Zähler und Nenner den gemeinsamen Factor haben $\left(\varkappa'\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} + e^{i\omega}\right)$,

$$k = e^{-i(\vartheta+\omega)}\frac{\varkappa + e^{i\omega}\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}}{1 - \varkappa\,e^{-i\omega}\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}} \quad \ldots\ldots \quad 11\,b).$$

So entspricht also jede Drehung der Kugel nur einer linearen Transformation der Variablen $\varkappa$. Indessen nicht jede lineare Transformation entspricht einer blossen Lagenveränderung der Kugel. Denn setzen wir diese Transformation in die allgemeine Form

$$k = a\,\frac{\varkappa + b}{1 - \varkappa c},$$

so wird

$$k = 0 \quad \text{für} \quad \varkappa = -b$$

$$k = \infty \quad \text{für} \quad \varkappa = \frac{1}{c}$$

$$\varkappa = 0 \quad \text{für} \quad k = ab$$

$$\varkappa = \infty \quad \text{für} \quad k = -\frac{a}{c}.$$

Nun sind aber 0 und ∞ diametral entgegenstehende Punkte der Kugel, folglich müssen auch

$$-b \quad \text{und} \quad \frac{1}{c}$$

$$ab \quad \text{und} \quad -\frac{a}{c}$$

solche diametral entgegenstehende Punkte sein. Das heisst nach 11a), es müssen b und c conjugirte complexe Grössen sein, und ebenso ab und $\frac{c}{a}$. Wenn das erstere der Fall ist, so folgt aus dem letzteren, dass a den Modul 1 haben muss. Die allgemeine Form einer solchen Transformation, welche einer Lagenveränderung der Kugel entspricht, ist also

$$k = e^{i\eta} \frac{\varkappa + a + bi}{1 - \varkappa(a - bi)} \Bigg\} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11\text{c}).$$

Dass die Gleichung 11b) in diese Form passt, ist leicht ersichtlich. Durch diese eine Gleichung, in Verbindung mit der gemachten Annahme

$$\xi^2 + v^2 + \zeta^2 = r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

ist das verwickelte System der Gleichungen 1b) ersetzt.

Um die Drehungsaxe zu finden, ist zu bemerken, dass die Punkte der Drehungsaxe ihre Lage behalten, für sie also $\varkappa = k$ sein muss. Setzt man dies in 11c), so erhält man eine quadratische Gleichung für $\varkappa$, deren beide Wurzeln die diametral gegenüberliegenden Endpunkte $\varkappa$ und $\varkappa'$ der Drehungsaxe sind. Die Gleichung ist

$$0 = \varkappa^2 + \frac{e^{i\eta} - 1}{a - bi} \varkappa + \frac{a + bi}{a - bi} e^{i\eta}.$$

Daraus folgt, dass

$$\varkappa + \varkappa' = \frac{1 - e^{i\eta}}{a - bi} \qquad \varkappa\varkappa' = \frac{a + bi}{a - bi} e^{i\eta}.$$

Da $\varkappa$ und $\varkappa'$ von der Form sind

$$\varkappa = e^{il} \operatorname{tang} \frac{\beta}{2}$$

$$\varkappa' = -e^{il} \operatorname{cotg} \frac{\beta}{2},$$

so wird

$$\varkappa + \varkappa' = 2\, e^{il} \operatorname{cotg} \beta\,; \qquad \varkappa\varkappa' = -e^{2il},$$

Wenn wir setzen

$$a + bi = r e^{i\vartheta},$$

so ist

$$e^{il} = \sqrt{-\varkappa\varkappa'} = e^{i(\vartheta + \frac{1}{2}\eta)}$$

$$\operatorname{cotg} \beta = \frac{\varkappa + \varkappa'}{2\sqrt{-\varkappa\varkappa'}} = \pm \frac{\sin\left(\frac{1}{2}\eta\right)}{r},$$

wodurch die Lage der Drehungsaxe gegeben ist.

Wenn $\eta = 0$, ist auch $\varkappa + \varkappa' = \operatorname{cotg} \beta = 0$, die Drehungsaxe liegt also unter dieser Voraussetzung parallel der Ebene der Zeichnung. Eine solche Bewegung entspricht also dem Listing'schen Gesetze, wenn man das durch den Mittelpunkt der Kugel auf die Ebene gefällte Loth als die Blicklinie in ihrer Primärlage betrachtet, so dass deren Stellung durch die Coordinate $\varkappa = 0$ bezeichnet ist.

Ich will diese Betrachtungsweise noch benutzen, um die Abweichungswinkel η zu berechnen für den Fall, dass man von einer Anfangslage aus die Messungen beginnt, welche nicht Primärlage ist, eine Aufgabe, die ausserordentlich weitläuftige Rechnungen erfordert, wenn man sie mittels der Gleichungen 1 b) lösen wollte.

Es sei $a + bi$ die Ordinate der Primärstellung der Blicklinie. Ich bringe diese auf den Nullpunkt hin mittels einer dem Listing'schen Gesetze entsprechenden Drehung durch die Transformation

$$k = \frac{\varkappa - (a + bi)}{1 + \varkappa (a - bi)}.$$

Wenn ich jetzt die Blicklinie wieder gemäss dem Listing'schen Gesetze nach einem neuen Punkt richte, für den $\varkappa = c + di$ ist, k also

$$k = \frac{(c - a) + (d - b) i}{1 + (c + di)(a - bi)},$$

so wird die neue Variable $\mathfrak{k}$ nach dieser Transformation

$$\mathfrak{k} = \frac{k - \dfrac{(c - a) + (d - b) i}{1 + (c + di)(a - bi)}}{1 + k \dfrac{(c - a) - (d - b) i}{1 + (c - di)(a + bi)}}.$$

Setzt man statt k seinen Werth in $\varkappa$ ausgedrückt, so erhält man

$$\mathfrak{k} = \frac{\varkappa - (c + di)}{1 + \varkappa (c + di)} \cdot \frac{1 + (c - di)(a + bi)}{1 + (c + di)(a - bi)}$$

oder

$$\mathfrak{k} = e^{i\eta} \frac{\varkappa - (c + di)}{1 + \varkappa (c - di)},$$

wenn wir setzen

$$e^{i\eta} = \frac{1 + (a + bi)(c - di)}{1 + (a - bi)(c + di)} \quad \Bigg\} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 11 \text{ d}).$$

Durch diese letztere Gleichung ist die Grösse η gegeben, zerlegen wir sie in ihren reellen und imaginären Theil, und setzen wir

$$a + bi = r e^{it}$$

$$c + di = \varrho e^{i\tau} = \operatorname{tang} \frac{\alpha}{2} \cdot e^{i\tau}$$

$$\cos \eta = \frac{1 + 2 r \varrho \cos (t - \tau) + r^2 \varrho^2 \cos [2 (t - \tau)]}{1 + 2 r \varrho \cos (t - \tau) + r^2 \varrho^2}$$

$$\sin \eta = \frac{2 [1 + r \varrho \cos (t - \tau)] r \varrho \sin (t - \tau)}{1 + 2 r \varrho \cos (t - t) + r^2 \varrho^2}.$$

Diese Ausdrücke geben also die Drehungen, wenn man bei den Versuchen nicht von der Primärstellung, sondern von einer anderen Stellung des Auges ausgeht. Ist die ursprüngliche Abweichung r klein, so werden die Ausdrücke übersichtlicher, wenn man den Ausdruck von $\log (e^{i\eta})$ in Gleichung 11 d) in eine unendliche Reihe verwandelt,

$$\frac{1}{2}\eta = r\varrho \sin (t - \tau) - \frac{1}{2} r^2 \varrho^2 \sin 2 (t - \tau) + \frac{1}{3} r^3 \varrho^3 \sin 3 (t - \tau) \text{ etc.}$$

Dieser Ausdruck ist von der Form der Gleichung 9), Seite 505, und kann zur Berechnung der Fehler bequem gebraucht werden [1].

Bestimmung des Drehpunkts der Augen nach DONDERS [2]. Es wird zuerst der horizontale Durchmesser der Hornhaut mit dem Ophthalmometer bestimmt. Zu dem Ende bringt man unmittelbar über dem Ophthalmometer eine kleine Flamme an, die von der Hornhaut gespiegelt wird, und neben dem Ophthalmometer ein horizontal verschiebbares Gesichtszeichen, welches von dem beobachteten Auge fixirt wird. Dieses Auge wird übrigens von der Seite her durch eine helle Lampe stark beleuchtet, gegen deren Strahlen das Ophthalmometer geschützt ist. Man sucht nun das Ophthalmometer so einzustellen, dass jedes Doppelbild des Flammenreflexes mit einem Doppelbild je eines seitlichen Hornhautrandes zusammenfällt. Damit dies für beide Bilder des Lichtreflexes zugleich geschehen kann, muss die Mitte der Hornhaut gerade gegen das Ophthalmometer gekehrt sein. Um dies zu erreichen, muss man das Gesichtszeichen so lange hin und herschieben, bis der genannten Forderung Genüge geleistet wird. Der Winkel, um den die Platten des Ophthalmometers gedreht sind, entspricht dann der halben Breite der Hornhaut, und ist diese nach den auf S. 10 gegebenen Regeln daraus zu berechnen. Der Winkel, den die nach dem Auge gerichtete Axe des Ophthalmometers und die nach dem Gesichtszeichen gerichtete Blicklinie des Auges mit einander machen, entspricht der Abweichung der Blicklinie von der Axe der Hornhaut.

Um nun den Bogen zu bestimmen, den die Hornhaut beschreiben muss, um die Länge ihres eigenen queren Durchmessers im Raume zu durchlaufen, wurde vor dem zu untersuchenden Auge ein Ring aufgehängt, in welchem ein feines Haar senkrecht gespannt war. Dann wurde ermittelt, um wieviele Grade (ausgehend von dem Stand, wobei die Hornhautaxe auf das Kreuz des Ophthalmometers gerichtet war) nach beiden Seiten hin visirt werden musste, damit bei unbeweglich gehaltenem Kopfe nach einander jeder von den Rändern der Hornhaut mit dem Haare zusammenfiel. Die gefundene Anzahl von Graden stellte den Winkel dar, den das Auge hierbei um den Drehpunkt beschrieben hatte. Sehr bald stellte sich heraus, dass bei normalen Augen dieser Winkel ungefähr 56° betrug. DONDERS begann deshalb später jede Messung damit, ein Visir 28° nach links, ein anderes ebenso weit nach rechts von dem erstgenannten Visir, welches zur Einstellung des Lichtreflexes auf die Mitte der Hornhaut gedient hatte, aufzustellen. Der Kopf wurde so gedreht, dass bei dem Fixiren des einen seitlichen Visirs der eine Rand der Hornhaut mit dem Haar zusammenfiel, und es wurde untersucht, ob beim Fixiren des zweiten seitlichen Visirs der entgegengesetzte Rand der Hornhaut dem Haar entsprach. Nur selten war dies vollkommen der Fall; aber es stellte sich doch heraus, ob ein grösserer oder ein kleinerer Bogen beschrieben werden musste. Dem entsprechend wurden dann die beiden seitlichen Visire um gleich viel von dem mittleren entfernt, oder ihm genähert, bis man endlich ein genaues Zusammenfallen der Ränder der Hornhaut mit dem Haare erhielt. Indem man nun schnell einige Male abwechselnd nach dem einen und dem andern Visir sehen liess, wurde der Einfluss einer etwaigen früheren Bewegung des Kopfes beseitigt.

Wenn a die halbe Breite der Hornhaut ist, welche man mit dem Ophthalmometer gefunden hat, und β der Winkel, um den jedes seitliche Visir, vom beobachteten Auge gesehen, vom

[1] Eine Constructionsmethode, für denselben Zweck brauchbar, siehe unten in den Nachträgen.

[2] Archiv für die holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde. Bd. III, Hft. 3, S. 260—281.

mittleren absteht, so ist der Abstand des Drehpunkts von der horizontalen grössten Sehne der Hornhaut gleich a cotang β.

In vielen Fällen, namentlich bei Kurzsichtigen, war die Beweglichkeit des Auges zu beschränkt, um die Hornhaut den nothwendigen Raum durchlaufen lassen zu können. In diesen Fällen gebrauchte Donders einen mit zwei parallel ausgespannten Drähten, deren gegenseitiger Abstand (3,02 Millimeter) genau bestimmt war, versehenen Ring. Die Visire wurden so gestellt, dass abwechselnd der eine Draht mit dem Innen-, der andere mit dem Aussenrand der Hornhaut zusammenfiel. Um den durchlaufenen Raum zu ermitteln, war es dann nur nöthig, den Abstand der Drähte von der zuvor gefundenen Breite der Hornhaut abzuziehen, und dieser Werth wurde der ferneren Berechnung zu Grunde gelegt.

Die Resultate dieser Untersuchungen sind schon oben angegeben.

Prüfung des Drehungsgesetzes der Augen mit Hilfe der Nachbilder. Für normalsichtige Augen und für parallele Stellungen von deren Gesichtslinien ist es am einfachsten die Versuche vor einer grossen mit hellgrauer Tapete überzogenen Wand anzustellen, die ein nicht zu scharf gezeichnetes Muster hat, an dem horizontale und verticale Linien hervortreten. Man befestigt in der Höhe der Augen ein horizontales rothes Band, auf dem man sich den Mittelpunkt für die Fixation durch einen schwarzen Punkt bezeichnet. Wenn man diesen Punkt kurze Zeit fixirt und dann nach der Tapete hinblickt, sieht man ein hellgrünes Nachbild des Bandes, und kann leicht erkennen, ob dasselbe den horizontalen Linien des Tapetenmusters parallel läuft, oder von ihrer Richtung abweicht.

Um die Richtung der Primärstellung der Blicklinie in Beziehung auf den Kopf zu fixiren, benutze ich ein Brettchen, welches ein Visirzeichen trägt und zwischen die Zähne genommen wird. Es ist in *Fig. 167* in geometrischer Projection abgebildet. Das Brettchen AB (13 Centimeter lang, 4 breit) hat bei A einen den Zahnreihen entsprechenden bogenförmigen Ausschnitt, bei B trägt es eine vierkantige hölzerne Säule, an der ein horizontaler Streif CC aus steifem Papier mit Klebwachs, und daher leicht verschieblich, befestigt ist. Die Ränder des Ausschnitts A werden auf beiden Seiten mit einem Wulst von heissem Schellack bedeckt, und wenn dieses zu erhärten beginnt, drückt man die beiden Zahnreihen in den Schellack ab, indem man das Brettchen fest zwischen die Zähne nimmt. Ist das Harz erkaltet, so ist nachher die Lage des Brettchens zwischen den Zahnreihen unverrückbar festgestellt, und nach jeder Unterbrechung der Versuche immer wieder in genau unveränderter Weise herzustellen.

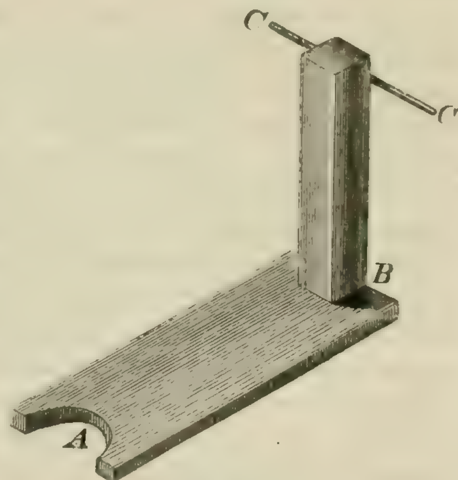


Fig. 167.

Der Papierstreifen CC wird so lang gemacht, als die Distanz der Drehpunkte der Augen. Man erkennt dies leicht, wenn man nach einem unendlich entfernten Objecte hinsieht. Dann erscheint der Papierstreifen in einem binocularen Doppelbilde; man macht ihn so lang und dreht ihn so, dass die einander zugekehrten Enden seiner Doppelbilder gerade auf einander stossen. Alsdann müssen die spitzen Enden des Streifens von einander um die Entfernung der Drehpunkte (oder eigentlich der Centra der Visirlinien) beider Augen von einander entfernt sein und ihre Verbindungslinie mit der Verbindungslinie der beiden Drehpunkte in einer Ebene liegen.

Wenn man nun die Beobachtungen beginnen will, welche entweder mit beiden oder mit je einem Auge ausgeführt werden können, ist es nöthig, zuerst die Primärstellung der Augen empirisch zu suchen. Dies geschieht, indem man von der gewählten Stellung aus, der Mitte des rothen Streifens gegenüber an der andern Seite des Zimmers, die Mitte des rothen Streifens eine Zeitlang fest fixirt, an dem entsprechenden Ende des Streifens CC vorbeiblickend, und dann sein Nachbild entweder gerade nach oben und unten, oder horizontal nach rechts und links verschiebt, und bemerkt, ob dasselbe den horizontalen Linien der Tapete parallel bleibt oder nicht. Ist das letztere der Fall, so muss man den Papierstreifen des Visirbrettchens

verschieben, bis man die richtige Stellung desselben gefunden hat. Und zwar muss man den Papierstreifen weiter nach links schieben, wenn man nach oben blickend das linke Ende des Nachbildes höher, nach unten blickend dasselbe tiefer stehend findet. Findet man nach oben blickend dagegen das rechte Ende des Nachbildes höher, nach unten blickend dasselbe tiefer, so verschiebt man nach rechts. Man verschiebe den Streifen dagegen nach oben, wenn man nach links blickend das linke, nach rechts blickend das rechte Ende des Nachbildes tiefer stehend findet, und umgekehrt.

Hat man endlich für jedes Auge die Stellung des Visirzeichens gefunden, wobei das Auge in die Primärstellung kommt, so ist dadurch zunächst constatirt, dass es eine Lage des Auges giebt, von der aus sich der Blick horizontal fortbewegt durch Drehung um eine verticale Axe und vertical durch Drehung um eine horizontale Axe.

Während aber bei der Verschiebung des Blicks gerade nach oben oder gerade nach unten, und gerade nach rechts oder links die Nachbilder horizontaler und verticaler Urbilder horizontal und vertical bleiben, findet man, dass dies nicht gilt für die Verschiebung des Blicks schräg nach aufwärts oder abwärts. Man findet vielmehr, dass

1) bei der Richtung des Blicks nach rechts oben oder links unten
   das Nachbild einer Horizontallinie gegen die Linien der Wand links gedreht,
   das Nachbild einer Verticallinie rechts gedreht erscheint, und
2) bei der Richtung des Blicks nach links oben oder rechts unten
   das Nachbild einer Horizontallinie rechts gedreht,
   das einer Verticallinie links gedreht erscheint.

Da horizontale und verticale Linien verschiedene Drehung zeigen, so ergiebt sich daraus schon, dass zwischen ihnen Linien existiren müssen, deren Nachbilder der ursprünglichen Richtung parallel sind.

Am einfachsten ist es nun, den Kopf so seitwärts zu neigen, dass man zur Durchlaufung der horizontalen und verticalen Linien der Wand schräge Bewegungen des Auges zum Kopfe auszuführen hat. Dadurch dass man auch bei solcher Kopfstellung an dem Visirzeichen vorbei nach dem Mittelpunkt des rothen Streifens blickt, sichert man sich, dass man wieder als Anfangstellung die Primärstellung des Auges einhält. Die Richtung, in welcher sich die Bilder der beiden Spitzen des als Visirzeichen dienenden Papierstreifens auf die Wand projiciren, bezeichnet auf dieser die Richtung der Verbindungslinie der Drehpunkte. Bei solchen Augen, deren Bewegungen dem Gesetze von Listing folgen, bleiben dann auch bei seitwärts geneigtem Kopfe die Nachbilder horizontaler Streifen den Horizontallinien der Wand parallel, wenn man den Blickpunkt längs der Verticallinie und der Horizontallinie verschiebt, die durch die Mitte des rothen Streifens gehen. Ebenso verhält es sich mit den Nachbildern eines verticalen Streifens in Beziehung auf die verticalen Linien der Tapete.

Diese Beobachtungen, wobei das Nachbild auf eine verhältnissmässig entfernte Wand geworfen wird, haben den Vortheil, dass kleine Verschiebungen des Kopfes nach rechts oder links, oben oder unten, einen verschwindend kleinen Einfluss auf die durch das Visirbrettchen gesicherte Lage der Blicklinie haben, und dass ferner die Augen von selbst in paralleler Stellung erhalten werden. Dagegen sind die Wände unserer Zimmer in der Regel nicht gross genug, um auch die Prüfung in den extremen Stellungen der Blicklinie bei hinreichend grosser Entfernung von der Wand vornehmen zu lassen, und für Kurzsichtige ist diese Beobachtungsart nicht zu gebrauchen, weil sie ohne Brille nicht für die Wand accommodiren können, und Brillengläser, wenn sie nicht centrisch und senkrecht zur Gesichtslinie stehen, die scheinbare Neigung der gesehenen Linien verändern können. Für Beobachtungen in der Nähe habe ich die von mir früher beschriebene Methode abgeändert, um auch den Einfluss der Convergenz sicherer untersuchen und die Grösse und Form des Gesichtsfeldes bestimmen zu können.

Als Gesichtsfeld dient eine an der Wand befestigte grosse hölzerne Tafel, die mit hellgrauem Papier glatt überzogen ist. Um die Stellung des Kopfes vor dieser sicher fixiren zu können, ist vor ihr in einer für die Accommodation des Beobachters passenden Entfernung ein kleines Tischchen aufgestellt und mit eisernen Klammern am Boden befestigt. Auf dem Tischchen ist ein eiserner Halter mit beweglichen Armen befestigt, wie man ihn in chemischen

Laboratorien vielfach gebraucht, und dieser hält ein Brettchen ähnlich dem der *Fig. 167*, aber ohne die Säule und das Visirzeichen. Das Brettchen dient nur dazu, dem Kopfe des Beobachters, wenn er die Zähne darauf fest beisst, eine sichere Stellung der Tafel gegenüber zu geben. Mittels der Zähne kann die Stellung des Kopfes viel besser gesichert werden, als durch irgend welche Befestigung, welche nur die Weichtheile desselben unmittelbar unterstützt. Ein zweiter verstellbarer horizontaler Arm des Halters wird so festgeschraubt, dass die Stirn gegen ihn anliegt. Auf der Tafel wird dann, dem einen oder andern Auge gegenüber, ein passend gefärbter Streif aus sehr steifem Papier oder dünnem Holz befestigt, der in seiner Mitte mit einem Stechknöpfchen, und um dieses drehbar, befestigt wird. Den Streifen mache ich entweder halb weiss und halb schwarz, oder halb grün und halb roth, so dass die Trennungslinie beider Farben der Länge des Streifens parallel durch die Mitte seiner Breite hinläuft. Diese Trennungslinie giebt dann ein gut gezeichnetes Nachbild. Ferner werden feine schwarze Fäden horizontal und vertical über die Mitte des Streifens hingespannt, und die Stellung des Zahnbrettchens so lange geändert, bis die Nachbilder des horizontalen Streifens längs des horizontalen Fadens verschoben diesem parallel bleiben, und ebenso die Nachbilder des vertical gestellten Streifens längs des verticalen Fadens. Dabei ist aber zu bemerken, dass die Gesichtslinien parallel gehalten werden müssen, und um dies zu controlliren, mache ich in der Entfernung meiner Augen von einander (68 Millimeter) Punkte auf den Stellen der Tafel, nach denen ich hinblicke, den einen dicht an der Linie, nach der ich hinblicke, den andern in gleicher Höhe seitwärts, so dass, wenn ich die beiden Punkte mit parallelen Gesichtslinien betrachtete, sie sich scheinbar vereinigen.

Auf diese Weise kann man die Primärlage des einen und andern Auges finden, — sie liegen bei mir um die Distanz der Augen selbst von einander entfernt, — dann kann man nachher dem Streifen, von dem das Nachbild genommen wird, beliebige schräge Richtungen geben, und Fäden über seine Mittellinie hinspannen, um längs dieser die Nachbilder zu verschieben. Um convergente Gesichtslinien zu haben, kann man, nachdem das Nachbild in einem Auge entwickelt ist, entweder einen Punkt der Tafel selbst mit beiden Augen fixiren, oder beliebige hingesetzte Punkte mit convergenten oder überkreuzten Blicklinien zusammenfallen machen.

Wenn dann, wie bei Convergenzstellungen, die Nachbilder nicht genau mit dem Faden zusammenfallen, längs dessen Richtung man den Blick hinbewegt hat, so kann man den Streifen selbst schief gegen den Faden stellen, und diejenige Stellung desselben suchen, deren Nachbild dem betreffenden peripherischen Theile des Fadens parallel wird. Der Winkel zwischen dem Streifen und dem Faden lässt sich leicht berechnen, wenn man den Abstand misst, den der über den Streifen laufende Faden an beiden Enden desselben mit seiner Mittellinie macht. Oder bequemer, kann man auch gleich auf den beiden Enden des Streifens eine Gradeintheilung anbringen, die nur wenige Grade zu umfassen braucht.

Die Genauigkeit, mit welcher die Vergleichung der Richtung der Nachbilder mit der der Fäden geschieht, geht bis zu einem halben Grade etwa. Das ist freilich keine mit der von astronomischen Beobachtungen zu vergleichende Genauigkeit; aber ich glaube, es wäre bei der Natur des Gegenstandes illusorisch, nach einer sehr viel grösseren Genauigkeit zu streben. Denn schon bei diesen Beobachtungen findet man gewisse kleine Veränderungen, die nicht blos von der Convergenz, sondern auch von dem Wege abhängen, auf dem das Auge in die betreffende Stellung gebracht worden ist, und selbst an verschiedenen Tagen zu wechseln scheinen. Solche habe ich selbst nicht ganz selten gesehen, namentlich bei Schrägstellungen des Auges, noch deutlicher und grösser waren sie bei Dr. Berthold, der in meinem Laboratorium arbeitete, und ich vermuthe, dass sie überhaupt bei kurzsichtigen Augen grösser sein werden, weil diese, hauptsächlich auf nahe Gegenstände angewiesen, an diesen je nach dem Grade der Convergenz stärker wechselnde Raddrehungen bei derselben Richtung der Blicklinie einüben müssen.

Herr E. Hering hat Versuche zur Controlle der Genauigkeit der Nachbildversuche angestellt, aus denen er schliesst, dass Irrthümer in der Vergleichung ihrer Richtung mit objectiven Linien vorkommen könnten, welche einen Spielraum bis zu 5 Grad hätten. Solche Irrthümer

muss ich bei gut entwickelten Nachbildern nach scharfer Fixation des Objects für geradezu unmöglich erklären; ich habe schon vorher angeführt, dass bei sorgfältiger Anstellung der Versuche die Fehler einen halben Grad nicht überschreiten. Abweichungen von einem Grad, die ich an dem beschriebenen Apparat leicht absichtlich herstellen konnte, sind bei guter Ausführung des Versuchs sicher zu erkennen. Ich schliesse vielmehr aus den Versuchen von Herrn Hering, dass sein Auge entsprechende Schwankungen in seiner Stellung ausgeführt hat, was namentlich dadurch bedingt sein kann, dass er das fixirte Object in 10 Zoll Entfernung vor sich hatte, und bei einäugiger längerer Betrachtung eines so nahen Objects starke Schwankungen der Convergenz vorzukommen pflegen.

Die Methode der Nachbilder ist unter den bisher bekannten Methoden zur Bestimmung der Stellung eines jeden einzelnen Auges, unabhängig vom andern, die zuverlässigste, wenn sie gut eingeübt ist. Sie erfordert namentlich in der Form, wie ich sie oben beschrieben habe, nicht, — was mir von grossem Gewicht zu sein scheint, — dass das Auge lange in peripherischen Stellungen verweile, sondern jeder einzelne Versuch ist schnell beendet.

Auch die Methode von Wundt [1] benutzt die Nachbilder zur Bestimmung der Augenstellungen. Derselbe entwirft die Nachbilder auf eine verstellbare und gegen die Blicklinie immer senkrecht stehende Scheibe, die an einem beweglichen Hebelarm befestigt ist. Sein Apparat hatte Winkeltheilungen, um die oben als *Longitudo, Latitudo* bezeichneten Winkel und die Raddrehung des verticalen Meridians gegen die Verticallinie abzulesen.

Prüfung des Drehungsgesetzes mittels des blinden Flecks. Diese Methode erlaubt ebenfalls, die Stellung jedes einzelnen Auges ganz unabhängig vom andern zu bestimmen. Sie wurde zuerst von A. Fick [2] angewendet. An der grauen Wand eines geräumigen Zimmers war in der Höhe, in welcher sich das Auge des auf einem Stuhle sitzenden Beobachters befand, ein geeignetes kleines Fixationsobject angebracht, ein weisser Kreis mit schwarzem zackigen Rande. Für das Auge wurde ein etwas über 6 Meter entfernter Standort so gewählt, dass die Sehlinie, wenn sie das Object fixirte, die erwähnte Wand senkrecht traf. Unter diesem Standort waren am Boden die Stellungen bezeichnet, welche die Füsse des Stuhls haben mussten, wenn seine vordere Kante bestimmte Neigungen gegen die Wand haben sollte. Bei allen diesen Stellungen des Stuhles blieb die Mitte zwischen den hinteren Füssen an demselben Platze. Fick sass auf diesem Stuhle, den Rücken angelehnt, den Kopf gerade aus gerichtet, und fand, dass er auf diese Weise genügend sicher die Medianebene des Kopfes senkrecht zu der anderen Kante des Stuhles einstellte. Um die Neigung des Kopfes gegen die Horizontale zu beurtheilen, wurde ein hölzerner über den Kopf gehender Bügel mittels zweier Schrauben in den Gehörgängen befestigt und ein von seiner Mitte herabgehender gebogener Eisenstab auf die Nasenwurzel gestützt. Der Bügel hatte somit eine feste Lage zum Kopfe. An der in das linke Ohr gehenden Schraube hing ein Loth, das vor einem mit dem Bügel fest verbundenen Gradbogen spielte. So konnte die Neigung des Kopfes oder einer in der Medianebene gedachten Geraden gegen den Horizont bestimmt werden.

An der Wand war ein Blatt grauen Cartons drehbar um einen Stift im Fixationspunkte befestigt. Mittels einer über eine Rolle laufenden Schnur konnte der Beobachtende den Carton drehen. Auf diesem war ein schwarzer Fleck gemalt, in einer solchen Entfernung, dass er bei passender Einstellung in den blinden Fleck fiel. Ein Gehülfe las die Neigung des Kopfes ab, und wenn eine bestimmte Neigung hergestellt war, stellte sich der Beobachter mittels der Schnur den Carton so, dass der schwarze Fleck verschwand. An einer Tangentenskala konnte die Drehung des Cartons abgelesen werden. So wurde bestimmt, um wie viel das Auge gegen seine Anfangsstellung gedreht war. Die Drehung des Stuhles mass den als *Longitudo* bezeichneten Winkel, der Gradbogen am Ohr die *Latitudo.* Es kamen bei Wiederholung der Versuche Differenzen der Raddrehungswinkel vor bis zu 3 Grad; wenn man die Stifte, die in die Ohren gesteckt waren, mit der Lehne des Stuhles fest verbände und einen recht hellen

---

[1] Archiv für Ophthalmologie, Bd. VIII, 2, S. 16 und 17.
[2] Moleschott's Untersuchungen zur Naturlehre des Menschen. V, 193—233.

weissen Fleck auf dunklem Grunde gebrauchte, der der Projection des blinden Flecks an Grösse und Gestalt genau entspräche, würde sich vielleicht eine grössere Genauigkeit dieser Methode erreichen lassen.

Meissner[1] hat den Kopf festgestellt und das Gesichtszeichen, auf welchem sich der dunkle Fleck befand, bewegt. Der Kopf wurde zu dem Ende passend so festgestellt, dass sich das Auge in dem Mittelpunkte eines verticalen halben Gradbogens von 10 Zoll Radius befand, der um seine verticale Axe um einen zu messenden Winkel gedreht werden konnte (Fick's *Longitudo*, Meissner's *Latitudo*). An dem Gradbogen verschieblich, um einen Winkel, der abgelesen werden konnte (Fick's *Latitudo*, Meissner's *Longitudo*), befand sich ein Schieber, der an seiner dem Centrum zugekehrten Seite, um eine eben dahin gerichtete Axe drehbar, die Scheibe mit dem dunklen Flecke trug. Meissner's Resultate sind in der hier folgenden Tabelle zusammengestellt; und zwar ist der unmittelbar abgelesene Winkel, der dem k' der Gleichung 4e) entspricht, angegeben.

		Nasenwärts				Schläfenwärts		
		+30	+20	+10	0	−10	−20	−30
Gehoben	−30	−3	0	+2	0	+3	+6	+10
	−15	+0,5	+1,5	+2,5	0	+1,5	+3	+5
	0	+7	+5	+4	0	0	0	0
Gesenkt	+15	+12,5	+8,5	+5	0	−1,5	−2,5	−5
	+30	+19	+13	+7	0	−3	−6	−9,5
	+35	+20,5	+14	+7,5	0	−3	−7	−10
	+40	+20,5	+14	+7	0	−3	−7,5	−11
	+45	+21	+14,5	+7	0	−3	−8	−12
	+50	+21,5	+14,5	+7	0	−3	−8,5	−13

Der ziemlich unregelmässige Gang der Werthe macht es wahrscheinlich, dass Convergenzänderungen, die bei einäugiger Fixirung eines sehr nahen Objects schwer zu vermeiden sind, Einfluss gehabt haben. Meissner selbst betrachtet seine Versuche als annähernd übereinstimmend mit dem Gesetze von Listing, glaubt aber, dass für die nasenwärts gerichteten Stellungen eine andere Primärlage zu nehmen sei, die unter 45° gegen die Horizontale nach unten gerichtet ist, für die nach aussen gewendeten Stellungen dagegen liege die Primärlage in der Horizontalebene selbst. Um diess Verhältniss heraustreten zu lassen, hat er die Versuche noch einer Umrechnung unterworfen.

Von Fick's Versuchen habe ich die Mittelwerthe in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Longitudo	*Latitudo* −33	−30	−28	−14	−11	−6	0	+1	+4	+18	+45
−29			−4°,7								
−26					+3°,5						
−21									+1,5		
−14		−2°								+5°,7	
−13				+2°,5							
−10								+2°			
0	+2,5						0				+0°,1
+10								+0°,1			
+13				+1,7						−1°,8	
+14		−4°,7									
+21									−0,°3		
+26					+3°,4						
+29			+7,5								
+38						+2°,9				−3°,3	

[1] Zeitschrift für rationelle Medicin. Reihe 3, Bd. VIII.

Prüfung der Augenstellungen mittels der Vergleichung correspondirender Bilder beider Augen. Die hierher gehörigen Methoden lassen, wie es scheint, eine viel grössere Genauigkeit zu, als die der Methode der Nachbilder; sie können aber nur dazu dienen, die Stellungen beider Augen mit einander zu vergleichen, nicht die Stellung eines jeden einzelnen Auges zu finden. Sie sind deshalb sehr brauchbar, um die kleinen individuellen Abweichungen der Bewegungen vom LISTING'schen Gesetz zu finden. Auch kommt es in gewissen Fällen, namentlich für die Theorie des binocularen Sehens gerade wesentlich darauf an, die Differenzen in der Stellung beider Augen zu finden.

Die erste Anwendung dieser Methoden rührt von MEISSNER [1] her. Er machte darauf aufmerksam, dass, wenn man einen gerade vor sich und normal zur Blickebene gehaltenen Draht so betrachte, dass man die Augen auf einen nahe vor oder nahe hinter dem Drahte gelegenen Punkt convergiren lasse, der Draht der Regel nach nicht in parallelen Doppelbildern erscheine, sondern in solchen, die eine gewisse Neigung gegen einander haben, und dass man den Draht selbst gegen die Visirebene neigen müsse, um ihn in parallelen Doppelbildern zu sehen. Aus der Lage des Drahtes gegen die Visirebene ergab sich dann leicht die Stellung, welche die verticalen correspondirenden Meridiane beider Augen haben, und daraus kann man die Raddrehung des Auges wenigstens für die medianen Lagen des Convergenzpunktes ableiten. MEISSNER fand durch die nach dieser von ihm sehr sinnreich erdachten Methode ausgeführten Untersuchungen im Wesentlichen das Gesetz von LISTING bestätigt, wenn auch gewisse Fehlerquellen, die erst durch spätere Untersuchungen aufgefunden wurden, gewisse Correctionen seiner Resultate nothwendig machen möchten. Erstens nämlich kannte er noch nicht den Unterschied der scheinbar verticalen Meridiane des Auges von den wirklichen, und glaubte, der früher allgemein gemachten Annahme entsprechend, dass unendlich entfernte Verticallinien sich auf identischen Meridianen beider Augen abbilden müssten, was bei den meisten Augen nicht der Fall ist. Zweitens kannte er nicht den von VOLKMANN aufgefundenen Einfluss der Convergenz auf die Raddrehungen jedes einzelnen Auges. Auch kann wohl die Beurtheilung des Parallelismus der Doppelbilder durch den Umstand beeinträchtigt werden, dass das eine Ende des Drahtes den Augen bald um eine grössere, bald um eine kleinere Strecke näher ist, was der Beobachter weiss und wahrnimmt, und dass dadurch die Anschauung des Parallelismus der Doppelbilder als zweier geneigter körperlichen Linien sich einstellen kann, statt der Anschauung ihres Parallelismus im Gesichtsfelde, auf die es ankommt.

Es möchte deshalb die von VOLKMANN [2] gemachte Abänderung des Verfahrens von MEISSNER zweckmässiger sein: VOLKMANN hat an einer vor den Augen gelegenen senkrechten Wand zwei Drehscheiben so angebracht, dass der Drehpunkt einer jeden in der Blicklinie des bezüglichen, auf unendliche Ferne gerichteten Auges liegt. Auf jeder Scheibe ist eine feine Linie verzeichnet, welche das Centrum der Scheibe schneidet und also mit der Umdrehung dieser ihre Lage ändert. Zur Bestimmung der Lagenveränderung ist im Umkreise der Scheibe ein Gradmesser angebracht. Der Beobachter betrachtet die beiden auf den Scheiben verzeichneten Linien unter minimaler Convergenz der Augen, so dass er sie in wenig distanten Doppelbildern sieht, und sucht diese Doppelbilder durch Drehung der einen Scheibe parallel zu stellen.

Durch häufige Wiederholung solcher Einstellungen kann man sehr genaue Mittelwerthe erlangen. VOLKMANN hat diese Methode zwar nicht für verschiedene Kopfstellungen angewendet, um Schlüsse über die Bewegungen zu machen, aber sie lässt sich dazu anwenden, wenn man die Scheiben bei verschiedenen Kopfstellungen betrachtet.

VOLKMANN's Apparat lässt sich, wie ich gefunden habe, hierfür noch zweckmässig vereinfachen. Für die Prüfung der Parallelstellungen meiner eigenen Augen habe ich an einer verticalen Holztafel zwei durch kleine Gewichte gespannte Fäden aufgehängt, einen weissen vor schwarzem Grunde und einen schwarzen vor weissem Grunde. Die Entfernung der Stifte, an denen die Fäden hingen, wurde so gewählt, dass bei den Beobachtungen die fixirten

---

[1] Beiträge zur Physiologie des Sehorgans 1851.
[2] Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik, Leipzig, 1864. Heft 2, S. 199—240.

Mittelpunkte der Fäden die Distanz meiner Augen, 68 Millimeter, hatten. Nach unten hin lehnten sich die Fäden an zwei Nadeln, die in das Holz eingesteckt waren und die Fäden etwas convergiren machten. Hinter der Mitte der Fäden, die zu fixiren war, war eine horizontale Linie gezogen, gerade in der Höhe meiner Augen. Die Fäden wurden mit parallel gerichteten Gesichtslinien betrachtet, wobei sie in denselben Ort des gemeinschaftlichen Sehfeldes zu liegen kommen, und die Nadel am unteren Ende des einen wurde so lange verschoben, bis sich die Fäden nicht mehr kreuzten, und bei schwacher Convergenz nicht mehr in divergenten, sondern in parallelen Bildern erschienen. Dadurch dass man den Fäden verschiedene Farbe giebt, lässt sich ihre Congruenz im Gesichtsfelde besser beurtheilen, als wenn sie gleichfarbig sind, wobei sie leicht stereoskopisch verschmelzen, selbst wenn sie sich durchaus noch nicht decken. Wenn man sie als nahe Doppelbilder sieht, so erscheinen ihre Mitten getrennt und ihre Enden vereinigt. Man muss dann darauf achten, dass die Vereinigung nach oben und nach unten hin in derselben Weise vor sich geht.

Indem ich den Kopf vorüber und hintenüber neigte, konnte ich diese Versuche mit parallel gesenkten und parallel gehobenen Gesichtslinien wiederholen, und fand in der That kleine Abweichungen von dem durch Listing's Gesetz hierbei geforderten vollkommenen Parallelismus ihrer Stellungen, so dass der Winkel der scheinbar verticalen Meridiane bei parallel bis zur oberen Grenze des Blickfeldes gehobenen Blicklinien um 0°,3 grösser ist als bei parallelem tiefsten Stande der Blicklinien, und sich hierbei im ersteren Fall das obere Ende des verticalen Meridians jedes Auges um 0°,15 mehr nach aussen gedreht findet, als in der zweiten Stellung. Bei späteren Wiederholungen dieser Versuche fand ich es noch vortheilhafter, dem einen Auge als Object einen geradlinig begrenzten rothen Streifen von 3 Millimeter Breite, dem andern einen blauen Faden, beide auf schwarzem Grunde zu zeigen. Der Faden muss in der Mitte des rothen Streifens erscheinen.

Volkmann selbst hat seine Versuche über die Augenstellungen nach einer Abänderung dieser Methode ausgeführt. Nämlich statt der Drehscheiben mit Durchmessern wendete er solche mit je einem ausgezogenen Radius an, und bemühte sich bei binocularer Betrachtung diese Radien scheinbar in eine gerade Linie zu stellen. Der Kopf wurde dabei passend festgestellt; die Drehscheiben wurden in zwei dunkle Röhren eingesetzt, welche mittels passender Gelenke beliebig gerichtet werden konnten, so dass jedes Auge durch je eine Röhre auf eine Drehscheibe hinsah, und dieselbe immer senkrecht zur Blicklinie des Auges eingestellt blieb.

Versuche mit parallelen Gesichtslinien angestellt ergaben, dass die Abweichungen beider Augen von der durch das Listing'sche Gesetz geforderten Congruenz bei Volkmann's Augen sehr gering sind. Beim Blicke gerade nach oben oder nach unten, gerade nach rechts oder links von einer Stellung aus, welche Volkmann mittels Nachbildversuchen als Primärstellung gefunden hatte, ergaben gar keine Differenz. Richtungen der Blicklinie schräg nach oben oder unten dagegen gaben kleine Abweichungen. Die folgenden Zahlen sind Mittelzahlen aus je 60 Beobachtungen, wobei in je 30 der bewegliche Radius dem rechten, in je 30 anderen dem linken Auge angehörte, und geben die Kreuzungswinkel der scheinbar eine senkrechte gerade Linie bildenden Radien

Primärstellung:	2°,21
30 Grad nach oben rechts:	2°,74
Ebenso weit nach oben links:	2°,92
Ebenso nach unten links:	1°,31
Ebenso nach unten rechts:	1°,41.

Die grösste Abweichung von dem Winkel der Primärstellung ist 0°,9, was für jedes Auge bei gleichmässiger Vertheilung des Fehlers 0°,45 geben würde, eine Grösse, die durch Versuche mit Nachbildern allerdings nicht mehr zu entdecken sein würde.

Volkmann fand ferner nach derselben Methode, dass bei Convergenz auf einen 30 Centimeter entfernten Punkt in der Horizontalebene der Winkel der scheinbar verticalen Meridiane von 2°,15 bis auf 4°,16 stieg, so dass sich jedes Auge dabei um etwa einen Grad drehte,

was bei derselben Richtung der Gesichtslinie und paralleler Stellung der anderen Gesichtslinie nicht der Fall gewesen sein würde.

Ich finde an meinen eigenen Augen eine sehr kleine Abweichung bei der Convergenz, aber in demselben Sinne wie VOLKMANN. Die Beobachtung geschah mittels eines feinen schwarzen Fadens, dessen Mitte durch ein Nadelöhr gezogen war. Die Nadel war in dem ebenen Felde einer weiss angestrichenen Thür in der Höhe meiner Augen befestigt, die Enden des Fadens über zwei andere in gleicher Höhe befestigte Nadeln geleitet und durch Gewichte gespannt. Der Faden bildete also zwei gerade Linien, die in dem Nadelöhr unter einem veränderlichen Winkel zusammenstiessen. Je nachdem man die seitlichen Nadeln etwas höher oder tiefer einsteckte, konnte man diesen Winkel nach oben oder nach unten sich öffnen lassen. Die beiden Schenkel des Winkels blieben dabei immer in einer der Thürfläche parallelen Ebene. Wenn ich mit parallelen Gesichtslinien sehen wollte, hielt ich vor die mittlere Nadel einen senkrechten Streifen steifen Papiers von 68 Millimeter Breite. Bei parallelen Blicklinien treffen dann die noch sichtbaren seitlichen Theile der Fäden scheinbar in der Mitte zusammen und bilden einen Winkel. Ich veränderte die Stellung der Nadeln so lange, bis mir dieser Winkel gleich zwei Rechten erschien, also seine beiden Schenkel in eine gerade Linie fielen. Dann fixirte ich das Oehr der Nadel aus 20 Centimeter Entfernung, während ich zwischen meinem Nasenrücken und der Nadel ein Blatt Papier so anbrachte, dass ich mit jedem Auge nur die gleichseitige Hälfte des Fadens sehen konnte. Wenn die Fixation auch in der Primärstellung der Visirebene geschah, erschien mir der Faden doch nicht mehr geradlinig, sondern ich musste die eine Hälfte desselben etwas senken, damit er wieder geradlinig erschien. Die der Convergenz auf 20 Centimeter entsprechende Drehung jedes meiner Augen würde hiernach 17 Minuten ($0^{0},28$) betragen, während sie bei VOLKMANN $1^{0},37$ betrug.

Bei VOLKMANN ist diese Drehung stark genug, dass er sie an dem Nachbilde einer gefärbten verticalen Linie wahrnehmen kann, welche er mit einem Auge bei parallelen Blicklinien fixirt hat, wenn er das Nachbild nachher mit convergenten Blicklinien dicht neben die Linie entwirft. Dasselbe gelang auch Prof. WELCKER bei VOLKMANN. Ganz ähnliche Versuche hatte übrigens auch J. B. SCHUURMAN [1] angestellt mit negativem Erfolge, während Prof. DONDERS bei angestrengter Convergenz Drehungen von 1^{0} bis 3^{0} bemerkte, in demselben Sinne wie VOLKMANN und ich. Viel deutlichere Abweichungen, durch Convergenz bewirkt, bemerkte ich, wie schon oben gesagt ist, bei der Untersuchung der Nachbilder in peripherischen Stellungen der Blicklinie.

Bestimmungen der Ansatzpunkte und Drehungsaxen für die Augenmuskeln. Die Wirkung dieser Muskeln ergiebt sich leicht aus ihrer Lage und Befestigung. Da ihre Sehnen alle eine Strecke über den Augapfel hin verlaufen und sich seiner Wölbung anlegen, wie Bänder, welche über eine Rolle laufen, so üben alle diese Muskeln einen Zug auf den Augapfel in tangentialer Richtung aus. Um die Richtung dieses Zuges genauer zu bestimmen, muss man durch den Punkt, wo sich die Sehne anlegt, eine Tangente an den Augapfel legen, welche für den oberen schiefen Augenmuskel nach dessen Sehnenrolle hin zu ziehen ist, für die übrigen Muskeln dagegen nach ihrem knöchernen Ursprunge hin.

Da der Augapfel in seiner natürlichen Befestigung nur Drehungen um seinen Mittelpunkt ausführt, so haben wir die Wirkung der Muskeln auch nur insofern zu beachten, als dadurch solche Drehungen entstehen. Wird ein Körper, der frei um einen Punkt drehbar ist, wie der Augapfel, durch eine Kraft excentrisch angegriffen, so findet man die Richtung der daraus entstehenden Drehung, wenn man durch die Richtung der Zugkraft und durch den Drehpunkt eine Ebene legt und im Drehpunkt auf dieser ein Loth errichtet. Dieses Loth ist die Axe der betreffenden Drehung. Die Richtung des Zuges ist, wie wir gesehen haben, bestimmt durch den Punkt, wo sich die Sehne an den Muskel legt, und den Punkt, wo der Muskel (oder beziehlich seine Sehnenrolle) am Knochen festsizt. Durch diese beiden Punkte und den Drehpunkt des Auges ist also jedesmal die Lage der zur Drehungsaxe normalen Ebene

[1] Vergelijkend Onderzoek der Beweging van het Oog; Academisch Proefschrift. Utrecht 1863.

bestimmt. Wenn man also die Lage jener drei Punkte geometrisch bestimmt, lässt sich daraus die Lage der Drehungsaxe finden.

Solche geometrische Bestimmungen sind von RUETE [1] und A. FICK gemacht worden, RUETE nahm zuerst die Schädeldecke durch einen Sägenschnitt nahe über der Orbita weg, stellte dann den Kopf so auf, dass er die Stellung hatte, die er im Leben bei aufrechter Stellung zu haben pflegt. Darauf wurde ein Sägenschnitt in der Mitte zwischen beiden Augenhöhlen perpendiculär durch das *Os frontis*, durch die Mitte der *Crista galli*, der *Sella turcica* und den Rücken der Nase so tief heruntergeführt, dass er einen geraden, vorn überstehenden Draht fest einlegen konnte, in einer Richtung, die mit den gerade nach vorn und horizontal gewendeten Sehaxen parallel stand, um sich später nach dieser Linie orientiren zu können. Darauf wurden beide Augen bis zur normalen Spannung aufgeblasen, dann horizontal parallel gerichtet und durch jedes Auge ein feiner, sehr zugespitzter Stahldraht in der Richtung der optischen Axe bis hinten in den Knochen der Orbita langsam rotirend durchgestossen, um die Augen in ihrer Lage zu fixiren. Um die Lage der Augen noch mehr zu sichern, wurde in einigen Fällen auch noch eine Decke von Gyps über die geschlossenen Augenlider gegossen.

Darauf wurden die Augenhöhlen vorsichtig von oben geöffnet und die Ursprünge und Insertionen der Muskeln sorgfältig frei präparirt, ohne von dem dazwischenliegenden Fett mehr wegzunehmen, als zur Darstellung der genannten Punkte nöthig war. Die Winkel, welche die Muskeln mit der optischen Axe bildeten, wurden dadurch gemessen, dass winkelig gebogene Drähte angelegt wurden. Die Abstände der Ursprünge und Insertionen der Muskeln vom Mittelpunkte der Augen nach oben und unten, nach rechts und links, nach hinten und vorn mass er mit dem Zirkel. Die Messungen wurden von drei Beobachtern wiederholt.

In letzterer Beziehung möchte es indessen wohl vorzuziehen sein, die Entfernungen der Muskel-Ursprünge und Ansätze, des Scheitels der Hornhaut und des Sehnerveneintritts von drei festen Punkten zu messen, wie FICK gethan hat, und danach die Coordinaten und die Lage des Mittelpunkts des Augapfels zu berechnen, da die Lage des letztern anatomisch nicht charakterisirt ist, und directe Messungen des senkrechten oder horizontalen Abstandes zweier nicht genau senkrecht oder horizontal neben einander liegender Punkte mit dem Zirkel ziemlich unsicher bleiben müssen. Im Mittel aus den Messungen an vier Köpfen giebt RUETE folgende Werthe in Millimetern, wobei die x vom Mittelpunkt des Auges horizontal nach aussen, die y nach hinten, die z senkrecht nach oben gehen.

	Ansätze			Ursprünge		
	x	y	z	x	y	z
Rectus superior	+ 2,00	— 5,667	+ 10	—10,67	+ 32	+ 4
„ inferior	+ 2,20	— 5,767	— 10	—10,8	+ 32	— 4
„ externus	+10,80	— 5,00	0	— 5,4	+ 32	0
„ internus	— 9,90	— 6,00	0	—14,67	+ 32	0
Tendo obliqui superioris	+ 2,00	+ 3,00	+ 11	—14,1	— 10	+ 12
Obliquus inferior	+ 8,00	+ 6,00	0	— 8,1	— 6	— 15

Durchmesser des Auges = 24 Mm.

Die Angaben von A. FICK sind folgende:

	Ansätze			Ursprünge		
	x	y	z	x	y	z
Rectus superior	0	— 7,9	+ 9,1	— 16	+31	+ 6,5
„ inferior	0	— 7,9	— 9,1	— 17	+30	+ 2
„ externus	+ 9,1	— 7,9	0	— 15	+31	+ 2
„ internus	— 9,1	— 7,9	0	— 18	+30	+ 4
Obliquus superior	+ 4,6	+ 2,7	+ 9,9	— 19,6	—10,9	+12,8
„ inferior	+10,4	+ 6,0	0	— 18	+30 (?)	+ 6
Sehnerveneintritt	— 3,4	+11,5	0			
Scheitel der Cornea	0	—12	0			

[1] RUETE ein neues Ophthalmotrop. Leipzig 1857.

Die Werthe von y und z für den Ursprung des *Obliquus inferior* müssen, wie Ruete schon bemerkt hat, fehlerhaft sein; beide sind nämlich jedenfalls negativ.

Die Lage der Drehungsaxen hat Ruete aus seinen Coordinatenmessungen berechnet und giebt folgende Werthe für die Winkel a, b, c, welche die (nach unserer Bezeichnung negative) Drehungshalbaxe mit den Richtungen beziehlich der positiven x, y und z macht:

	a	b	c
R. internus	90°	90°	180°
R. externus	90°	90°	0°
R. superior	161½	109½	90°
R. inferior	19°	71°	90°
Obl. superior	51°	141°	84½
Obl. inferior	127°	37°	90°

Wie die Drehungen um verschiedene Axenpaare sich zusammensetzen, ist oben erörtert worden; da die Anschauung dieser Verhältnisse schwer übersichtlich zu machen ist, hat Ruete [1] zuerst unter dem Namen Ophthalmotrop ein drehbares Modell der beiden Augen construirt, an welchem die Muskeln durch entsprechend gezogene Fäden dargestellt sind, die durch Federn gespannt werden, und deren Verschiebungen man an einer Skale ablesen kann. Zur Versinnlichung der Vorgänge wird in der Regel die von Knapp vereinfachte Form des Instruments genügen, welche in *Fig. 168* dargestellt ist. Die beiden künstlichen Augäpfel sind mittels eines Kugelgelenks um ihren Mittelpunkt drehbar; der Aequator, die Hornhaut, der verticale und horizontale Meridian sind auf ihnen angegeben, und starke seidene Fäden verschiedener Farbe an denjenigen Stellen befestigt, wo sich die Muskeln am Augapfel befestigen. Damit die Fäden die Richtung der Muskeln erhalten, sind vier von ihnen, welche den vier geraden Augenmuskeln entsprechen, durch vier nahe neben einander liegende Löcher des Brettchens A gezogen, und hängen hinter dem Brettchen durch Gewichte ausgespannt herab. Zwei von den Fäden aber, die den beiden schiefen Augenmuskeln an jedem Auge entsprechen, sind über die kleinen Rollen am oberen und unteren Ende des verticalen Messingbalkens B gezogen und dann um die Rollen herum nach der Mitte des Brettchens A geleitet, wo sie ebenfalls durch Löcher gehen und durch Gewichtchen gespannt sind. Die gleichnamigen Muskeln beider Augen sind durch gleichfarbige Fäden dargestellt. Macht man nun mit einem oder beiden Augäpfeln eine beliebige Drehung, so werden diejenigen Fäden angezogen, welche Muskeln entsprechen, die bei der betreffenden Bewegung des Auges gedehnt werden, und also der Bewegung widerstehen würden. Umgekehrt werden diejenigen Fäden nachlassen und ihre Gewichte sinken, deren entsprechende Muskeln am Auge sich bei den betreffenden

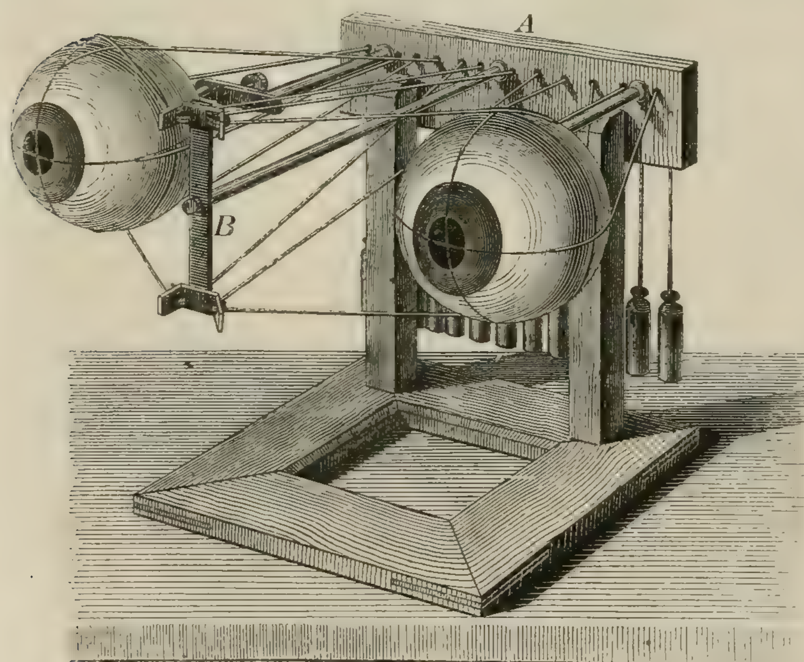


Fig. 168.

[1] Ein neues Ophthalmotrop. Leipzig 1857. — Das Ophthalmotrop, dessen Bau und Gebrauch. Göttingen 1845, aus dem ersten Bande der Göttinger Studien.

Bewegungen verkürzen, und die also im Stande sind, die Bewegung hervorzubringen oder zu unterstützen. Indem man also darauf achtet, welche Gewichte und um wie viel sie herabsteigen, kann man unmittelbar sehen, welche Muskeln und mit welcher Intensität etwa in Thätigkeit versetzt werden müssen, um die betreffende Bewegung hervorzubringen. Für Demonstrationen und namentlich um schnell eine Uebersicht über die oft sehr verwickelten Verhältnisse der pathologischen Abweichungen zu gewinnen, ist der Apparat sehr geeignet.

Ein anderes Ophthalmotrop hat WUNDT [1] construirt, an welchem die Fäden mit Spiralfedern verbunden sind, deren Kraft und Länge denen der Augenmuskeln möglichst proportional gemacht worden sind, und an welchem der Augapfel von selbst die den Versuchen von WUNDT über die Augenstellungen entsprechende Richtung annimmt, wenn seine der Blicklinie entsprechende Axe in die verlangte Stellung übergeführt wird. WUNDT hat dies Modell namentlich zur Erläuterung seines Princips von der geringsten Anstrengung benutzt, aus welchem er das Gesetz der Augenbewegungen herleitete.

Die ersten Untersuchungen über Bewegung der Augen bezogen sich auf die Lage des Drehpunkts. JOH. MÜLLER [2] meinte noch, dass der Drehpunkt des Auges in der Mitte seiner Hinterfläche liegen müsste, eine Meinung, die auch von TOURTUAL [3] und SZOKALSKY [4] vertheidigt wurde. VOLKMANN [5] suchte mittels seines Gesichtswinkelmessers den Kreuzungspunkt der Richtungslinie zu ermitteln und den Drehpunkt, wie oben S. 88 schon auseinandergesetzt ist, zu bestimmen; er glaubte, dass beide Punkte zusammenfielen; der Punkt, den er bestimmte, war in Wirklichkeit wohl der Drehpunkt, der nach ihm 5,6''' hinter der Hornhaut liegen sollte. Der daran sich knüpfende Streit mit MILE, KNOCHENHAUER, STAMM und BUROW ist ebenfalls schon oben erwähnt. Der Letztere machte genauere Bestimmungen des Drehpunktes [6]. Für den Abstand dieses Punktes von der Hornhaut fand er im Mittel von 40 Beobachtungen 5,42''' mit einer grössten Abweichung von 0,8'''. VALENTIN [7] wiederholte diese Versuche, sowohl für horizontale, als für verticale Bewegungen, und fand im ersten Fall im Mittel 5,501''', im letzteren 5,08'''. Sehr viel später folgten die oben erwähnten Untersuchungen von JUNGE (in russischer Sprache veröffentlicht) und von DONDERS und D. DOIJER [8].

Auch die Untersuchungen über die Raddrehung hat JOH. MÜLLER begonnen [9]. Er sagt, dass er mittels verschiedener Punkte auf dem Augapfel, die er mit Tinte auf dem Weissen desselben bezeichnet hatte, habe erkennen können, dass das Auge während seiner Bewegungen nicht um seine Längsaxe gedreht werde. Diese Meinung blieb die herrschende unter den Physiologen, bis eine Arbeit von HUECK [10] den Anstoss zu vielen Untersuchungen gab. HUECK versuchte eine schon von HUNTER geäusserte Meinung zu vertheidigen, nämlich dass bei der Neigung des Kopfes nach der Schulter eine entgegengesetzte Drehung des Auges um die Gesichtsaxe stattfinden sollte. Diese Drehung schreibt er den schrägen Augenmuskeln zu. Er meinte sich von der Richtigkeit seiner Behauptung überzeugt zu haben, indem er sowohl bei sich selbst, wie bei anderen, die Verschiebungen der Conjunctival-Gefässe bei Bewegungen des Kopfes beobachtete.

Die von HUECK aufgestellten Behauptungen wurden von den meisten Physiologen als richtig angenommen. Obgleich TOURTUAL [11] mit Recht bemerkte, dass die Axendrehung für die Functionen des Gesichts durchaus nicht nothwendig sei, und obgleich RITTERICH und RUETE Widerspruch gegen die Thatsache erhoben, so wurde die Meinung von HUECK doch von TOURTUAL, BUROW [12], VALENTIN [13], KRAUSE [14] und VOLKMANN [15] vertheidigt. TOURTUAL selbst überzeugte sich schon, indem er die Stellung des blinden Flecks untersuchte, dass die schein-

---

[1] Archiv für Ophthalmologie, VIII. 2, 88.
[2] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1826. S. 254.
[3] MÜLLER's Archiv 1840. S. XXIX.
[4] C. R. 1843.
[5] Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. 1836. S. 33.
[6] Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. 1842.
[7] Lehrbuch der Physiologie des Menschen Bd. II, 1844.
[8] Archiv für die Holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde. 1863, III, 560.
[9] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. 1826, S. 254.
[10] Die Achsendrehung des Auges. 1838.
[11] MÜLLER's Archiv 1840, S. LV und LIX; 1846, S. 346.
[12] Beiträge zur Physiologie des Auges. S. 8.
[13] Repertorium 1842. S. 407. Lehrbuch der Physiologie II. 332.
[14] Handbuch der Anatomie. 1843, S. 550.
[15] Artikel Sehen in Wagner's Handwörterbuch S. 273.

bare Drehung des Auges im Kopfe wenigstens nicht zureiche, um die Orientirung der Meridiane des Auges ganz unverändert zu lassen. RUETE [1] bewies mittels der Nachbilder, dass eine Drehung des Auges bei Neigungen des Kopfes (und unveränderter Stellung des Auges im Kopfe) überhaupt nicht eintrete. DONDERS [2] benutzte diesen Gedanken von RUETE zu einer eingehenderen Prüfung des Gegenstandes. Er wies zunächst nach, wodurch HUECK bei seinen Beobachtungen getäuscht worden war; dass er nämlich nicht hinreichend darauf geachtet hatte, die Stellung des Auges im Kopfe unverändert zu erhalten, während er die Stellung des Kopfes selbst änderte, und dass die von ihm beobachteten Drehungen von dem ersteren, nicht vom letzteren Umstande abhingen. Er fand ferner, dass die Nachbilder verticaler Objecte bei rein horizontalen und rein verticalen Bewegungen der Augen parallel bleiben, aber bei schräg seitlich gerichteten Hebungen und Senkungen sich schräg stellen. Ein bestimmtes Gesetz für die Grösse dieser Schiefstellung hat er nicht aufgestellt.

Ein solches Gesetz war indessen von LISTING [3] aufgestellt worden, und zwar dasjenige, welches für die meisten normalsichtigen Augen in der That sehr genau zuzutreffen scheint. Er hat aber keinen Beweis dafür gegeben und es nicht einmal selbst veröffentlicht. MEISSNER [4] unterwarf dieses Gesetz zuerst einer empirischen Prüfung mittels der Methode der Doppelbilder und fand es im Wesentlichen durch seine Versuche bestätigt; er suchte die Bedeutung des LISTING'schen Gesetzes daraus herzuleiten, das dasselbe den grössten Horopter gebe, ein Punkt, der weiter unten zu besprechen ist.

Nach einer anderen Erklärung des Raddrehungsgesetzes suchten FICK [5] und WUNDT [6], die auf das LISTING'sche Gesetz weiter keine Rücksicht genommen haben, und von denen der erstere mittels des blinden Flecks, der letztere durch Nachbilder die Stellungen seines Auges bestimmte. Sie waren der Ansicht, dass der Augapfel denjenigen Grad der Raddrehung annehme, der es erlaube, die verlangte Richtung der Gesichtslinie mit der kleinsten Muskelanstrengung herzustellen. Dieser Satz ist höchst wahrscheinlich richtig, obgleich unsere Kenntniss der Bedingungen, von denen die Muskelanstrengung abhängt, noch nicht genügt, die Berechnung auf sicheren Grundlagen durchzuführen. WUNDT hat auch eine Art Ophthalmotrop, ein Modell des um einen Punkt drehbaren Auges hergestellt, an welchem die Augenmuskeln durch Messingfedern von entsprechender Länge und Stärke ersetzt waren, und an dem die Drehungen des Augapfels für die verschiedenen Lagen der Gesichtslinie den Beobachtungen von WUNDT an seinen eigenen Augen ziemlich gut entsprechend eintreten.

In Anbetracht des Umstandes aber, dass die Stärke der Muskeln selbst während des individuellen Lebens den von ihnen verlangten Leistungen sich anpasst, schien mir dies Princip, selbst wenn es sich als factisch richtig bewähren sollte, nicht den eigentlichen letzten Grund des Gesetzes enthalten zu können. Ich fand bei der Prüfung des LISTING'schen Gesetzes mit Hülfe von Nachbildern dieses für meine eigenen Augen und für die einiger anderer normalsichtiger Beobachter mit grosser Genauigkeit zutreffend; dasselbe bestätigte die Prüfung mit Doppelbildern für mein eigenes Auge. Ich suchte die Methode namentlich so zu verändern, dass die Stellung des Kopfes besser gesichert war, und dass Ermüdung der Muskeln durch Winkelmessungen in seitlichen Stellungen des Auges vermieden wurde, und suchte den Grund des Gesetzes in dem oben gegebenen Principe der leichtesten Orientirung [7]. Einwände gegen die Methode der Beobachtung und gegen die Begründung des Gesetzes, welche E. HERING [8] aufstellte, habe ich oben zu beseitigen gesucht. Die oben mitgetheilten Angaben von VOLKMANN rühren zum grossen Theil aus noch ungedruckten brieflichen Mittheilungen her.

1826. JOH. MÜLLER zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig. S. 254.
1836. VOLKMANN neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtsinns, S. 33.
1838. HUECK die Achsendrehung des Auges. Dorpat.
1840. TOURTUAL, MÜLLER's Archiv für Anatomie und Physiologie, 1840, im Jahresbericht; S. XXIX; LV; LIX.
1842. BUROW Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. Berlin.

---

[1] Lehrbuch der Ophthalmologie, S. 14. Das Ophthalmotrop 1846. S. 9.
[2] Nederlandsch Lancet. 1846 August. Holländische Beiträge zu den anat. und physiol Wissenschaften. 1848. I 105—145; 384—386.
[3] RUETE Lehrbuch der Ophthalmologie; Ein neues Ophthalmotrop. 1857.
[4] Beiträge zur Physiologie des Sehorgans 1851. Archiv für Ophtalmologie II. 1855.
[5] MOLESCHOTT Untersuchungen Bd. V; S. 193. 1858; Zeitschrift für rationelle Medizin 1854. IV, S. 801.
[6] GRAEFE's Archiv für Ophthalmologie VIII, 1862. S. 1—114.
[7] Archiv für Ophthalmologie, IX, 153—214.
[8] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1864. S. 248—286.

1842. Valentin Repertorium 1842. S. 407.
— C. F. Krause Handbuch der menschlichen Anatomie. S. 550.
1843. Szokalsky in *C. R.* 1843.
1844. Valentin Lehrbuch der Physiologie des Menschen. II, 332.
1846. Tourtual in Müller's Archiv für Anat. und Physiol. 1846. S. 346.
— Ruete Lehrbuch der Ophthalmologie, S. 14. Das Ophthalmotrop, S. 9. Göttingen.
— F. C. Donders in Nederlandsch Lancet. 1846 August.
— Volkmann Artikel „Sehen" in Wagner's Handwörterbuch der Physiologie, III. 337—358. 281—290.
1847. F. C. Donders Beitrag zur Lehre von den Bewegungen des menschlichen Auges, in den Holländischen Beiträgen zu den anat. und physiol. Wissenschaften. I, 104—145; 384—386.
1854. G. Meissner Beiträge zur Physiologie des Sehorgans. Leipzig.
— Czermak über Abhängigkeit der Accommodation und Convergenz, Wiener Ber. XII, 337—358; XV 438—454.
— A. Fick die Bewegungen des menschlichen Augapfels, in Zeitschrift für rationelle Medicin IV, 801.
1855. G. Meissner die Bewegungen des Auges, im Archiv für Ophthalmologie, II, 1—123.
1857. Ruete ein neues Ophthalmotrop. Leipzig.
1858. A. Fick Neue Versuche über die Augenstellungen, in Moleschott's Untersuchungen zur Naturlehre des Menschen, V, 193.
1859. G. Meissner Ueber die Bewegungen des Auges, nach neuen Versuchen, Zeitschrift für rationelle Medicin, VIII, 1.
— J. v. Recklinghausen Netzhautfunctionen, Archiv für Ophthalmologie, V, 2. p. 127.
— W. Wundt Ueber die Bewegungen des Auges, Verhandl. des naturhist.-medicin. Vereins zu Heidelberg.
1862 W. Wundt über die Bewegungen der Augen, Archiv für Ophthalmologie, VIII. 2, p. 1—87.
— Derselbe, Beschreibung eines künstlichen Augenmuskelsystems zur Untersuchung der Bewegungsgesetze des menschlichen Auges. Ebenda VIII, 2. p. 88—114.
— F. C. Donders und D. Dojer die Lage des Drehpunktes des Auges, Archiv für die Holländischen Beiträge III, 560.
1863. H. Helmholtz über die normalen Bewegungen des menschlichen Auges, Archiv für Ophthalmologie IX, 2, p. 153—214.
— E. Hering Beiträge zur Physiologie 3tes und 4tes Heft. Leipzig (Kritisches gegen Meissner und Helmholtz).
— J. B. Schuurman vergelijkend Onderzoek der Beweging van het Oog bij Emmetropie en Ametropie, Dissert, Utrecht.
1864. Giraud Teulon in *C. R.* LVIII, p. 361 (über Drehpunkt).
Ausserdem Meissner's Jahresberichte über die Fortschritte der Physiologie in der Zeitschrift für rationelle Medicin von 1856 ab.

§. 28. Das monoculare Gesichtsfeld.

Bei dem gewöhnlichen Gebrauche unserer Augen sehen wir mit ihnen beiden zugleich, indem wir sowohl sie selbst im Kopfe hin und herbewegen, als auch von Zeit zu Zeit unsern Kopf und unsern ganzen Körper im Raume seinen Ort wechseln lassen. Dabei pflegen wir die Augen in der Weise herumschweifen zu lassen, dass beide bald diesen, bald jenen Punkt der vor uns liegenden Objecte fixiren, das heisst, beide sich so wenden, um das Bild des fixirten Punktes gleichzeitig auf den Centren der Netzhäute zu empfangen. Indem wir die Augen so gebrauchen, sind wir im Stande, richtige Wahrnehmungen des Ortes derjenigen gesehenen Gegenstände zu gewinnen, von denen das Licht ungestört in seinem geradlinigen Wege zu unserem Auge gelangt.

In der That lässt sich nach den im zehnten Paragraphen erörterten Gesetzen der Lichtbrechung im Auge einsehen, dass wenn bekannt ist die Stellung des Körpers und des Kopfes, ferner die Stellung beider Augen im Kopfe, und

somit auch die Lage ihrer Knotenpunkte, endlich die Orte der beiden Netzhäute, welche von den Bildern desselben leuchtenden Punktes getroffen werden, dass dann auch eindeutig bestimmt werden kann der Ort, wo der leuchtende Punkt sich wirklich befindet. Denn man ziehe von dem Netzhautbilde jedes Auges eine gerade Linie durch den Knotenpunkt, und verlängere sie. Beide Richtungslinien werden sich nur in einem Punkte schneiden können, und nur in diesem Punkte wird sich das leuchtende Object befinden können.

Von der Genauigkeit der einzelnen oben geforderten Bestimmungen wird es übrigens abhängen, mit welcher Genauigkeit der Ort des gesehenen Objects im Raume wirklich bestimmt wird.

Wenn also gegeben sind:

1) Empfindungen, welche genügen, um eine richtige Kenntniss zu gewinnen von der Stellung unseres Körpers und Kopfes gegen eine beliebig für die Abmessungen gewählte Grundlage, zum Beispiel den Fussboden, auf dem wir stehen,
2) Empfindungen, welche zu einem richtigen Urtheil über die Stellung unserer Augen im Kopfe genügen,
3) Momente in der Empfindung (sogenannte Localzeichen), durch welche wir die Reizung der von dem Lichte des Objectpunktes A gereizten beiden Netzhautstellen von der Reizung aller anderen Netzhautstellen unterscheiden können (von welcher Art diese letzteren sind, darüber wissen wir gar nichts; dass dergleichen da sein müssen, schliessen wir eben nur aus dem Umstande, dass wir Lichteindrücke auf verschiedenen Theilen der Netzhäute zu unterscheiden vermögen),

so ist hinreichendes Material gegeben, um den Ort des Punktes A im Raume unzweideutig daraus bestimmen zu können. Befände sich der Punkt A an irgend einem andern Orte des Raums, so würde er ein anderes Aggregat von Empfindungen erregen müssen. Die Erfahrung lehrt nun, dass wir im Allgemeinen auch wirklich durch das Gesicht die Orte der gesehenen Objectpunkte richtig bestimmen können. Die Genauigkeit dieser Bestimmung ist freilich eine wechselnde und hängt namentlich davon ab, wie nahe in beiden Augen die Bilder des Punktes A dem Centrum der Netzhautgrube liegen.

Wir werden nun also zu untersuchen haben, wieviel die genannten Momente der Empfindung einzeln genommen zu der genauen Wahrnehmung des Ortes der Objecte beitragen. Wir werden dabei nicht weiter untersuchen, von welchen Empfindungen die Beurtheilung der Stellung des Körpers zum Fussboden und des Kopfes zum Körper abhängig ist; die Untersuchung darüber gehört in die Physiologie der Sinneswahrnehmungen überhaupt, nicht in die des Gesichtssinnes. Wir nehmen also an, dass die Stellung des Kopfes gegen die zu Grunde gelegte Basis der räumlichen Abmessungen in jedem Falle genau bekannt sei. Dann bleibt also zu untersuchen, wieviel zur Erkenntniss des Ortes der Objecte beitragen

1) Bewegungen des Kopfes
2) Bewegungen der Augen im Kopfe
3) Sehen mit einem Auge
4) Sehen mit beiden Augen.

Wir beginnen unsere Untersuchung damit, dass wir feststellen, was beim Gebrauche nur eines Auges und beim Ausschluss aller Bewegungen des Kopfes erkannt werden könne. Die Bewegungen des betreffenden Auges im Kopfe dagegen werden in dem vorliegenden Abschnitte im Allgemeinen nicht ausgeschlossen.

Zunächst ist klar, dass wenn gegeben ist Ort und Stellung eines Auges, und der Ort des Netzhautbildes eines leuchtenden Punktes, für den das Auge accommodirt ist, so können wir von seinem Netzhautbilde eine gerade Linie durch den Knotenpunkt des Auges ziehen, und wissen zunächst, dass der leuchtende Punkt vor dem Auge in dieser Linie liegen müsse. In welchem Punkte dieser Linie er aber liege, bleibt nothwendig unbekannt, wenn wir keine anderen Hilfsmittel zur Entscheidung darüber haben. Zwar könnte man an die Accommodation des Auges denken. Wäre das Auge möglichst gut für den Punkt accommodirt, so würde möglicher Weise der Grad der Accommodationsanstrengung, oder die Grösse des vorhandenen Zerstreuungskreises Aufschluss über die Entfernung geben können. Wir werden im Paragraphen 30 untersuchen, welche Hilfsmittel beim monocularen Sehen für die Beurtheilung der Entfernung noch vorhanden sind, und dabei sehen, dass die Accommodation in der That ein ausserordentlich unvollkommenes Hilfsmittel für die Beurtheilung der Entfernung ist. Wenn wir also von den kleinen Unterschieden in der Schärfe des Bildes absehen, welche durch wechselnde Accommodation hervorgebracht werden können, so ist kein anderes Moment in der Empfindung vorhanden, welches darüber Aufschluss gäbe, in welcher Entfernung der leuchtende Punkt liegt.

Oben wurde vorausgesetzt, das Auge sei genau accommodirt für den leuchtenden Punkt. Dann können wir, um seine Richtung zu finden, von seinem Netzhautbilde, wie oben vorgeschrieben ist, die gerade Richtungslinie durch die Knotenpunkte ziehen, oder aber auch jedem anderen Strahle folgen, der von irgend einem Punkte der Pupille nach dem Netzhautbilde hinläuft. Wenn wir die Brechung eines solchen Strahls nach den im zehnten Paragraphen gegebenen Regeln richtig construiren, um seinen Weg vor dem Auge zu finden, wird uns jeder solcher Strahl schliesslich zu dem leuchtenden Punkte zurückführen, von dem er ausgegangen ist. In diesem Falle bleibt es also gleichgiltig, welchen von den in die Pupille gefallenen Strahlen wir wählen, um die Richtung zu bestimmen, in welcher der leuchtende Punkt liegt.

Dies ist aber nicht mehr gleichgiltig, wenn wir auf der Netzhaut Bilder von leuchtenden Punkten haben, für welche das Auge nicht ganz genau accommodirt ist. In solchen Fällen dürfen wir den Mittelpunkt des Zerstreuungskreises als den Ort des Netzhautbildes betrachten [1]. Der Strahl aber, welcher von dem leuchtenden Punkte nach der Mitte des eventuellen Zerstreuungskreises hingeht, geht, wie schon oben S. 93 bemerkt, durch den Mittelpunkt der Pupille und ist mit dem Namen einer Visirlinie belegt worden. Wenn sich der

[1] Es ist hier nur von leuchtenden Punkten die Rede; dass es sich an den Rändern leuchtender Flächen anders verhält, ist bei der Lehre von der Irradiation §. 21 auseinandergesetzt.

leuchtende Punkt längs dieser Visirlinie hin und her bewegen würde, so würde sich in der Empfindung nichts verändern, als dass das Zerstreuungsbild desselben kleine Vergrösserungen und Verkleinerungen erlitte, welche selbst bei sehr bedeutendem Wechsel der Entfernung unmerklich klein sein könnten.

Es lässt sich ferner zeigen, dass auch durch eintretende Accommodation des Auges für die Nähe der Mittelpunkt der Zerstreuungskreise auf der Netzhaut seinen Ort nicht merklich verändert. Die darauf bezügliche Rechnung wird am Ende dieses Paragraphen gegeben werden.

Um nun zur Anschauung zu bringen, was wir mit einem Auge ohne Hilfe von Bewegungen des Kopfes und ohne Berücksichtigung der Accommodationsunterschiede von der Aussenwelt erkennen können, dazu sind namentlich sehr weit entfernte Gegenstände als Gesichtsobjecte die passendsten Beispiele. Denn bei sehr weit entfernten Objecten bringen mässige Bewegungen unseres Kopfes keine andere Veränderung des Bildes hervor, als wir auch durch Drehungen das Auges allein hervorbringen können. Ja, beim Anblick unendlich entfernter Objecte ist es sogar gleichgültig, ob wir das zweite Auge ebenfalls öffnen, oder nicht. Denn der Gebrauch des zweiten Auges giebt uns nur dann ein neues verwerthbares Moment der Empfindung, wenn die in ihm gezogene Visirlinie die des ersten Auges irgendwo in einer messbaren Entfernung schneidet. Wenn beide Linien merklich parallel sind und neben einander in unabsehbare Entfernung hinauslaufen, so giebt uns das keinen Aufschluss über die wirkliche Entfernung des leuchtenden Objectes, ausser dem negativen, dass es jenseits einer gewissen Grenze der Entfernung liegen muss.

Betrachten wir weit entfernte irdische Gegenstände, so kann uns die früher gewonnene Bekanntschaft mit ihrer wirklichen Form und Entfernung, Farbe u. s. w. noch mancherlei Hilfe in der Deutung unseres Gesichtsfeldes gewähren. Wollen wir uns von allen diesen Hilfsmitteln früherer Erinnerung frei machen, so bietet sich uns ein Object dar, was für diese Untersuchung in ausgesuchter Weise passt, nämlich der gestirnte Himmel. An dem finden wir Objecte, von deren Form, Grösse und Entfernung uns durchaus keine frühere Anschauung unterrichtet hat, für deren Wahrnehmung der Gebrauch beider Augen und die etwa von uns ausgeführten Bewegungen durchaus nicht weitere sinnliche Momente gewähren, als ein einzelnes Auge gewähren kann, dessen Ort im Raume unverändert bleibt.

Unter diesen Umständen erscheinen uns die Objecte, welche in der That im Raume nach drei Dimensionen vertheilt sind, nur noch nach zwei Dimensionen ausgebreitet. Wir sind nur noch im Stande, die Richtung der Visirlinie zu erkennen, die zu jedem einzelnen gesehenen Punkte hinführt. Eine solche Richtung braucht zu ihrer Festsetzung nicht mehr drei Bestimmungsstücke, wie ein Punkt, sondern nur zwei; wie denn auch die Sterne in ihrer Lage bestimmt werden durch je zwei Winkel, entweder ihre Länge und Breite im Verhältniss zum Pol und Aequator, oder ihre Rectascension und Declination im Verhältniss zur Ekliptik.

Eine Raumgrösse von zwei Dimensionen ist eine Fläche; in einer solchen ist die Lage der Punkte festgestellt durch je zwei Bestimmungsstücke. Wenn

wir also beim Sehen mit einem Auge, dessen Drehpunkt seinen Ort im Raum nicht wechselt, die eine Dimension, die Entfernung, nicht zu unterscheiden vermögen, so können wir die Objecte nicht mehr im Raume, sondern nur noch wie an einer Fläche vertheilt sehen. Diese scheinbare flächenartige Anordnung der gesehenen Objecte nennen wir das Gesichtsfeld. So sehen wir zum Beispiel die Sterne an der imaginären Fläche des Himmelsgewölbes vertheilt.

Ich bitte den Leser darauf zu achten, dass ich nicht gesagt habe, die Gegenstände erschienen uns an oder auf einer Fläche vertheilt, sondern nur wie an einer Fläche, in flächenartiger Anordnung, in einer nach zwei Dimensionen unterschiedenen Anordnung. In der That stellen wir uns nicht nothwendig eine bestimmte Fläche in bestimmter Entfernung vor, an der die Sterne oder die fernen Berge des Horizonts angeheftet wären, wenn auch das eherne Himmelsgewölbe und die krystallinischen Sphären der alten Zeit der natürliche Ausdruck für eine kindlichere Art der Anschauung sind, in der man Alles recht greifbar zu machen suchte. Es ist dadurch manche Schwierigkeit in die physiologische Optik gekommen, dass man glaubte, in jedem Falle eine bestimmte Fläche, meist eine Kugelfläche, als das zeitweilige Gesichtsfeld jedes Auges annehmen zu müssen. Man kann sich jede Function von zwei Variablen auf einer Fläche darstellen. So haben wir im 20ten Paragraphen die Farben gleicher Helligkeit nach gewissen Regeln auf der Farbenscheibe dargestellt. Die beiden Variablen, nach denen die Farbe sich unterscheidet, sind hierbei der Farbenton und der Sättigungsgrad gewesen. Gehen wir durch eine continuirliche Reihe von Farbentönen von einer Anfangsfarbe aus und zu derselben wieder zurück (das heisst, ziehen wir eine geschlossene Linie in der Farbenscheibe), so zerfällt dadurch die Gesammtheit der Farben in zwei vollständig getrennte Gruppen (die ausserhalb und innerhalb jener Linie dargestellt sind), und wir können nicht von einer Farbe der einen Gruppe continuirlich zu einer der andern Gruppe übergehen, ohne durch eine der zuerst berührten Farben (die in der geschlossenen Linie liegen) hindurchzugehen. Dies letztere ist nun auch die Charakteristik einer einfach zusammenhängenden Fläche; jede geschlossene Linie, die wir in ihr ziehen, theilt sie in zwei Theile, und wir können nicht von einem Punkte des einen Theils zu einem des andern in der Fläche übergehen, ohne durch jene geschlossene Linie durchzugehen. Eben wegen dieser Analogie machen wir uns das System der Farben anschaulich, indem wir sie auf einer Fläche ausgebreitet darstellen, und mehr will es zunächst auch nicht sagen, wenn wir die Objecte auf die imaginäre Fläche des Gesichtsfeldes, deren Ort im Raume übrigens ganz unbestimmt bleibt, entwerfen.

Uebrigens ist auch leicht einzusehen, dass diese Anschauung einer flächenhaften Vertheilung der Gegenstände im Gesichtsfelde auch da erhalten bleiben muss, wo wir gleichzeitig mit ihr vollständig genaue und richtige Anschauungen der wirklichen Vertheilung der Objecte im Raume durch unsern Gesichtssinn haben. Denn immer wird die Eigenthümlichkeit in der Anschauung stehen bleiben, dass, wenn ich mit dem Blicke eine geschlossene Linie im Gesichtsfelde durchlaufen habe, ich von einem innern zu einem äusseren Punkte den Blick nicht überführen kann, ohne jene geschlossene Linie zu durchschneiden. Wenn

ich den Umfang eines Fensters mit dem Blick umschrieben habe, kann ich von einem Objecte, welches ich ausserhalb des Fensters sehe, nicht zu einem Objecte an den Wänden des Zimmers übergehen, ohne mit dem Blicke über den Rand des Fensters zu streifen, und dadurch ist das wesentliche Kennzeichen einer flächenartigen Anordnung der gesehenen Objecte gegeben, obgleich wir andererseits sehr wohl wissen, dass im wirklichen Raume unendlich viele Linien von jenem äusseren Punkte zu dem an der Zimmerwand gezogen werden können, welche die Umgrenzungslinie des Fensters durchaus nicht schneiden.

Eben weil wir in dieser Weise mit dem Blicke über die Gesichtsobjecte hinstreifend dieselben in einer flächenhaften Anordnung finden, ist es nun auch möglich, ihren Anblick durch flächenhafte Zeichnungen und Gemälde dem Auge zurückzurufen. Der Zeichner, welcher eine Landschaft abbilden will, bemüht sich nicht zu ermitteln, wie weit jeder Punkt der Landschaft von seinem Auge oder von einem anderen Punkte der Landschaft wirklich entfernt ist, sondern nur, ob er von dem ersten aus den Blick nach oben oder unten, nach rechts oder links wenden muss, und welche Excursion sein Auge etwa machen muss, um zu dem zweiten hinzugelangen. Das flächenhafte Bild wird von uns als ähnlich dem körperlichen Objecte anerkannt, wenn wir dieselben Bewegungen unseres Auges ausführen müssen, um von einem zum andern Punkte des Bildes zu gelangen, welche nöthig wären, um die entsprechenden Punkte des Objects nach einander zu erblicken.

Es ist weiter ersichtlich, dass wir auf diesem einfachen Wege auch die Anordnungsweise der Punkte in der scheinbaren Fläche des Gesichtsfeldes kennen lernen können, zunächst abgesehen von allen Grössenbestimmungen.

Was darunter zu verstehen ist, wird am leichtesten ersichtlich, wenn man sich ein flächenhaftes Bild auf eine dehnbare Kautschukplatte aufgetragen denkt. Diese kann man nachher beliebig ausrecken, und alle Längenverhältnisse zwischen ihren einzelnen Theilen, so wie die Winkel zwischen den einzelnen Linien der Grösse nach beliebig ändern, doch wird trotz aller Veränderungen jede geschlossene Linie, die durch dieselbe Reihe von Punkten des Bildes gezogen ist, immer denselben unveränderlichen Satz von anderen Bildpunkten in sich einschliessen und die andere Hälfte ausschliessen, und in jeder continuirlichen linienförmigen Reihe von Punkten des Bildes wird die Reihenfolge der Punkte unverändert bleiben, so sehr auch die Grösse und Form der einzelnen Theile einer solchen Linie sich verändert. Ebenso ist die Anordnungsweise der Punkte auf einer ebenen geographischen Karte und einem Erdglobus dieselbe, trotzdem dass die Grössenverhältnisse auf der ebenen Karte nicht genau denen auf dem Globus entsprechen können, um so weniger, ein je grösseres Stück der Erdoberfläche dargestellt ist.

Wenn wir zwei Flächen haben, und die Punkte der einen denen der anderen in einer festgesetzten Weise entsprechen, so nenne ich die Ordnung der Punkte auf beiden Flächen gleichartig, so oft allen solchen Reihen von Punkten der ersten Fläche die in einer continuirlichen Linie liegen, solche Punkte der anderen entsprechen, die ebenfalls in einer continuirlichen Linie liegen, und

wenn die Reihenfolge der Punkte in der ersten Linie dieselbe ist, wie die Reihenfolge der entsprechenden Punkte in der zweiten Linie.

Indem wir den Blick über das Gesichtsfeld schweifen lassen, finden wir unmittelbar in der Wahrnehmung, in welcher Ordnung die Objectpunkte im Gesichtsfelde aufeinander folgen, so dass zunächst wenigstens die Ordnung der Punkte im Gesichtsfelde durch solches Herumblicken unmittelbar bestimmt werden kann.

Wie und in wie weit die Grössenverhältnisse durch das Augenmaass bestimmt werden können, wollen wir nachher untersuchen. Hier ist zunächst nur noch zu bemerken, dass wenigstens das Auge des Erwachsenen die Ordnung der Punkte im Gesichtsfelde nicht nur an Objecten bestimmt, über welche der Blick schweifen kann, sondern dass wir ein bestimmt flächenhaft geordnetes Bild auch von solchen Objecten und Erregungen haben, die in Bezug auf unsere Netzhaut ihren Ort nicht wechseln und sich mit unserem Auge bewegen. Dies gilt für die Nachbilder, die Netzhautgefässe, die Polarisationsbüschel und überhaupt für die meisten subjectiven Erscheinungen. Wie wir auch das Auge bewegen mögen, immer wird derselbe Punkt eines solchen subjectiven Bildes dem Fixationspunkte entsprechen, und wir können nie verschiedene Theile des Bildes nach einander auf der Mitte unserer Netzhaut wechseln lassen. Daraus folgt, dass wir im Stande sind, die Ordnung der gesehenen Punkte im Gesichtsfelde auch zu beurtheilen nach dem blossen Eindruck, den das ruhende Netzhautbild auf die ruhende Netzhaut macht, ohne dass wir nöthig haben, jedes einzelne Mal durch Bewegungen zu controlliren, welches die Reihenfolge der einzelnen Objectpunkte sei.

Um diese Thatsache zu erklären, kann die Annahme gemacht werden und ist von den Anhängern der nativistischen Theorie gemacht worden, dass wir eine angeborene Kenntniss der Ordnung der Netzhautpunkte auf unserer Netzhaut (und auch wohl der Grösse ihrer Abstände) besitzen, welche uns unmittelbar in den Stand setzt, wahrzunehmen, welche Punkte des Netzhautbildes continuirlich aneinanderstossen, welche nicht. Wenn eine solche Annahme gemacht wird, so ist damit natürlich jede weitere Erörterung über den Ursprung unserer flächenhaften Gesichtsbilder abgeschnitten.

Andererseits ist ersichtlich, dass die Fähigkeit, auch ohne Bewegung des Auges die Ordnung der Objecte im Gesichtsfelde zu erkennen und zu beurtheilen, auch erworben sein kann, wie dies die empiristische Theorie der Gesichtswahrnehmungen annimmt. Denn jedes Mal, wo wir durch Bewegungen des Auges die Ordnung der Theile eines ruhenden Objects bestimmt haben, erhalten wir auch, so lange wir einen seiner Punkte ruhig fixiren, einen ruhenden Eindruck seiner verschiedenen Theile auf unsere Netzhaut, und können somit durch Erfahrung kennen lernen, wie zwei Punkte, die wir durch Bewegung des Auges als benachbart erkannt haben, sich im ruhenden Bilde des Auges darstellen, das heisst also, anatomisch gesprochen, wir können durch Erfahrung kennen lernen, welche Localzeichen der Gesichtsempfindungen benachbarten Netzhautfasern angehören, und wenn wir dies gelernt haben, werden wir im Stande sein, auch aus dem unveränderten Eindruck eines relativ

zum Auge ruhenden Objects die Anordnung der Punkte im Gesichtsfelde zu erkennen.

Wir werden also im Folgenden zu prüfen haben, ob ohne die Hypothese von der angeborenen Kenntniss der Anordnung der Netzhautpunkte die Thatsachen sich erklären lassen aus den bekannten Fähigkeiten des Sinnengedächtnisses. Directe Versuche über diese Frage an neugeborenen Kindern lassen sich natürlich nicht anstellen, und die Erfahrungen an operirten Blindgeborenen ergeben hierüber so gut wie nichts, da diese operirten sogenannten Blinden fast immer Staarkranke waren, welche durch ihre getrübte Linse allerdings sehr wenig zu sehen, aber doch die Richtung des stärkeren Lichts noch zu erkennen im Stande waren, und also der Erfahrungen über die Localisation ihrer Netzhauteindrücke nicht ganz entbehrten. In dieser Beziehung würden Fälle von angeborener Verschliessung der Pupille, die durch künstliche Pupillenbildung geheilt wurden, wo dergleichen vorkommen, viel wichtiger sein, als die Erfahrungen an operirten Staarkranken. Einige merkwürdige Fälle dieser Art sind am Ende dieses Abschnitts erwähnt.

Wir erkennen nun aber nicht blos die Ordnung der Objectpunkte im Gesichtsfelde in dem allgemeinen Sinne, wie es bisher besprochen ist, sondern wir erkennen auch bis zu einem gewissen Grade der Genauigkeit die Grössenverhältnisse der Linien und Winkel. Der Zeichner, welcher sich bemüht, den Eindruck der körperlichen Objecte durch ein flächenhaftes Bild wiederzugeben, darf nicht blos darauf ausgehen, die Punkte des Objects in der Reihenfolge auf seiner Zeichnung zu ordnen, wie unser Blick sie trifft, wenn er über sie hinschweift; er muss auch streben, gewisse Grössenverhältnisse einzuhalten zwischen den Abständen der einzelnen Punkte, damit wir die flache Zeichnung dem körperlichen Objecte ähnlich finden, und wenn wir eine Zeichnung auf einem Kautschukblatte ausführen und sie verschiedentlich ausrecken, so ändert sich ihr Anblick für unser Auge, trotzdem die Anordnung der Punkte in der Fläche dieselbe bleibt.

Um nun die auf die Beurtheilung der Grössenverhältnisse bezüglichen Thatsachen unzweideutig auseinandersetzen und ihrem Ursprunge nachforschen zu können, müssen wir noch einige Festsetzungen über die Flächen, auf welche wir uns die Bilder des Gesichtsfeldes projicirt denken wollen, vorausschicken.

Man braucht den Namen des Gesichtsfeldes in der Regel für die Erscheinung der vor uns liegenden Gesichtsobjecte, so lange man nicht auf ihre Entfernung von uns, sondern nur auf ihre scheinbare flächenhafte Anordnung neben einander achtet, ohne dabei bestimmt festzusetzen, ob die Objecte mit festgehaltenem oder mit schweifendem Blicke, oder vielleicht selbst mit Hülfe von Bewegungen unseres Kopfes und Körpers betrachtet werden sollen. In der nun folgenden Analyse unserer Wahrnehmungen wird es aber nöthig, diese verschiedenen Fälle von einander deutlich zu trennen. Der unbestimmte Name des Gesichtsfeldes mag beibehalten werden, wo es auf eine solche Unterscheidung des bewegten und unbewegten Auges nicht ankommt, oder wo zusammengegriffen werden soll, was sowohl das bewegte, wie das unbewegte Auge wahrnimmt, wie wir denn auch mit dem Worte Gesicht den ganzen Sinn in allen seinen

Anwendungen verstehen. Dagegen habe ich schon im vorigen Paragraphen mit Blickfeld dasjenige Feld bezeichnet, über welches der Blick des bewegten Auges hinlaufen kann. Dem entsprechend betrachte ich das Blickfeld als eine Fläche, die fest mit dem Kopfe verbunden ist, mit diesem sich bewegt, und in welchem ein Punkt, der Blickpunkt oder Fixationspunkt von einem, beziehlich beiden Augen so betrachtet wird, dass er sich auf dem Centrum der Netzhautgrube abbildet. Die Richtungen oben und unten, rechts und links werden im Blickfelde nach den entsprechenden Richtungen des Kopfes genommen. Ein Punkt des Blickfeldes ist ausgezeichnet dadurch, dass er der Fixationspunkt des entsprechenden Auges in seiner Primärstellung ist; wir wollen ihn den Hauptblickpunkt (primären Fixationspunkt) nennen. Den gerade gegenüber liegenden, hinter dem Kopfe des Beobachters gelegenen Punkt, welcher das andere Ende des nach dem Hauptblickpunkt gerichteten Durchmessers des Blickfeldes bildet, nennen wir, wie oben, den Occipitalpunkt. Im Kopfe bestimmt für unsere Zwecke die Verbindungslinie der Drehpunkte beider Augäpfel die horizontale Richtung von rechts nach links. Legen wir durch die genannte Verbindungslinie und den Hauptblickpunkt eine Ebene, so ist diese die horizontale Meridianebene des Blickfeldes, oder die Primärlage der Blickebene. Die übrigen Meridianebenen des Blickfeldes werden durch die Verbindungslinie des Hauptblickpunkts und des Drehpunkts des betreffenden Auges gelegt. Die Schnittlinien der Meridianebenen mit der imaginären Fläche des Blickfeldes sind die Meridiane dieses Feldes. Wenn beide Augen gebraucht werden, kann von Meridianebenen nicht gesprochen werden, ausser von der horizontalen, wohl aber von Meridianlinien, weil das Blickfeld so unendlich weit entfernt gedacht werden kann, dass die Richtung der Ebenen, welche durch einen Punkt des Blickfeldes und die Gesichtslinie des einen oder andern Auges gelegt sind, nicht merklich verschieden ist.

Ruhende äussere Objecte wechseln also ihren Platz im Blickfelde, wenn sich der Kopf bewegt; dieselbe Stelle des Blickfeldes wird nach einander auf verschiedenen Stellen der Netzhaut abgebildet, wenn sich das Auge bewegt. Dagegen verlangt Fixation derselben Stelle des Blickfeldes unausbleiblich immer dieselbe Stellung des Auges im Kopfe, und dieselben Verkürzungen, beziehlich Verlängerungen der einzelnen Augenmuskeln, so dass, wie wir vermuthen dürfen, jede Stelle des Blickfeldes mehr oder weniger genau bezeichnet ist durch die besonderen Innervationsgefühle und sonstige etwa vorhandenen Empfindungen der Nachbartheile des Auges, welche zu der betreffenden Stellung des Auges im Kopfe gehören.

Wir können das Blickfeld zum Zwecke seiner geometrischen Ausmessung als eine Kugelfläche von unendlich grossem Radius betrachten, ähnlich dem Himmelsgewölbe, deren Mittelpunkt im Drehpunkte des Auges gelegen ist. Der Ort eines gesehenen Punktes im Blickfelde wird gefunden, wenn man durch ihn und den Drehpunkt des Auges eine gerade Linie legt und diese bis zur imaginären Fläche des Blickfeldes verlängert denkt. Wo sie die Fläche des Blickfeldes schneidet, ist der geometrische Ort des gesehenen Punktes im Blickfelde, den wir in vielen Fällen zu unterscheiden haben werden von dem scheinbaren

Ort im Blickfelde, an welchen wir das gesehene Object nach der Schätzung vermittels des Augenmaasses verlegen.

Vom Blickfelde, das sich auf den bewegten Blick bezieht, unterscheiden wir das Sehfeld des Auges, welches wir uns mit dem Auge zugleich beweglich denken, so dass jeder Punkt des Sehfeldes immer auf demselben bestimmten Punkte der Netzhaut abgebildet wird. Dass durch veränderte Accommodation des Auges letzterer Punkt nicht wesentlich geändert werden kann, wird am Schluss dieses Paragraphen gezeigt werden. Das Sehfeld ist also gleichsam die nach aussen projicirte Netzhaut mit ihren Bildern und ihren sonstigen Eigenthümlichkeiten. Nachbilder, der Gefässbaum, der blinde Fleck, der gelbe Fleck projiciren sich also immer in die gleichen Orte des Sehfeldes. Jeder Punkt des Sehfeldes ist deshalb bezeichnet in der Empfindung durch diejenigen Localzeichen derselben, welche den Empfindungen der entsprechenden Netzhautstelle angehören, und es ist schon früher hervorgehoben worden, dass wir die locale Bestimmtheit der Empfindung irgend einer Sehnervenfaser sowohl in unseren eigenen Vorstellungen, als auch in der Mittheilung für andere gar nicht anders bezeichnen und ausprechen können, als indem wir die Stelle des Sehfeldes bezeichnen, der sie angehört.

Das Sehfeld selbst kann aber mit dem Blickpunkte seine Lage gegen das Blickfeld ändern. Um bestimmte Richtungen im Sehfeld festzusetzen, gehen wir von der Primärlage des Augapfels aus. In dieser Lage schneidet die horizontale Meridianebene des Blickfeldes das Sehfeld in einer Linie, die ich den horizontalen Meridian des Sehfeldes oder kürzer den Netzhauthorizont nennen werde. Die Meridianebenen des Sehfeldes sind durch die Hauptvisirlinie zu legen, das heisst, durch die Virsirlinie, welche nach dem Blickpunkte hinläuft, und die wir wohl als mit der Blicklinie, das heisst dem Strahl, der vom Blickpunkt nach dem Drehpunkt des Auges läuft, zusammenfallend denken können, da auch der Mittelpunkt der Pupille (siehe S. 18) wie die Gesichtslinie etwas nach der Nasenseite des Auges abweicht. Der Ort eines jeden gesehenen Objects im Sehfelde wird bestimmt durch die Visirlinie, welche durch den betreffenden Objectpunkt gezogen und bis zur Fläche des Sehfeldes verlängert ist.

Für die wissenschaftliche geometrische Ausmessung des Sehfeldes ist es am vortheilhaftesten, auch dieses als eine mit dem Blickfelde concentrische Kugelschale zu betrachten. Dass die scheinbare Lage der Punkte im Sehfelde der geometrischen Construction nicht entspricht, werden wir nachher freilich erfahren. Wir müssen demnach auch im Sehfelde einen geometrischen und einen scheinbaren Ort der Punkte unterscheiden, welcher letztere nach dem Augenmaasse bestimmt wird.

Wenn sich das Auge bewegt, verschiebt sich die Kugelfläche des Sehfeldes gegen die des Blickfeldes. Gegeben ist die Lage des Sehfeldes mittels der im vorigen Paragraphen entwickelten Gesetze der Augenbewegungen, sobald die Lage des Blickpunktes, der im Sehfelde eine unveränderliche Stellung hat, im Blickfelde gegeben ist. Denkt man sich die Primärstellung des Blickpunkts und die zeitige Lage desselben durch einen grössten Kreis verbunden, so muss, so weit die Augenbewegungen nach Listing's Gesetze erfolgen, der

horizontale Meridian des Blickfeldes und der Netzhauthorizont des Sehfeldes mit diesem Verbindungskreise gleiche Winkel machen.

Indem sich das Sehfeld gegen das Blickfeld verschiebt, bleibt der geometrische Ort für die Projectionen der einzelnen Objectpunkte in der gemeinsamen Kugelfläche des Blickfeldes und Sehfeldes nicht ganz unverändert. Um den Ort im Sehfelde zu finden, müssen gerade Linien vom Kreuzungspunkte der Visirlinien nach den Objectpunkten gezogen werden. Da nun der Kreuzungspunkt der Visirlinien etwa 3 Millimeter hinter der Hornhaut und 12,9 Millimeter vor dem Drehpunkte liegt, so verändert er seine Lage bei Drehungen des Auges, und dadurch wird die Richtung der Visirlinien ein wenig geändert. Indessen ist diese Aenderung verhältnissmässig sehr unbedeutend für Objectpunkte, die dem Auge nicht ziemlich nah sind. Die Rechnung ergiebt, dass die scheinbaren Verschiebungen der Objecte bei Bewegungen des Auges, welche 10 Grade nicht übersteigen, kleiner sind als die Ungenauigkeit der Bilder in dem für unendliche Ferne accommodirten Auge, und also der Regel nach unter der Ungenauigkeit der Accommodation verschwinden werden. Nur bei sehr nahen Objecten und bei ausgedehnten Bewegungen des Auges werden solche Verschiebungen merklich. Wenn man zum Beispiel nahe vor das Auge ein Bleistift hält, dessen Dicke der Breite der Pupille etwa gleich kommt, und sich dadurch eine Lichtflamme vollständig verdeckt, so kann man die Lichtflamme im indirecten Sehen wahrnehmen, wenn man das Auge stark nach der Seite wendet. Dann verschiebt sich das Zerstreuungsbild des nahen Bleistiftes so stark bei der seitlichen Bewegung des Auges, dass es nun die Lichtflamme nicht mehr verdeckt. Diese Methode ist mitunter vortheilhaft anzuwenden, wenn man ermitteln will, was man im indirecten Sehen erkennen kann, weil man hierbei das Object direct zu sehen gar nicht im Stande ist.

Sobald also nur ferne Objecte im Gesichtsfelde sind, die alle zugleich von dem für die Ferne accommodirten Auge ohne merkliche Undeutlichkeit gesehen werden können, so sind die Verschiebungen ihrer Projectionen in das Blickfeld verschwindend klein, und man kann den geometrischen Ort der betreffenden Objecte im Blickfelde als unabhängig von den Bewegungen des Auges betrachten.

Unter der angegebenen Einschränkung ist das Blickfeld die äussere Projection eines unveränderlichen Netzhautbildes, das Sehfeld das der Netzhaut selbst. Das Blickfeld und Sehfeld verschieben sich bei den Bewegungen des Auges gegen einander, wie das Netzhautbild der äusseren Objecte und die Netzhaut selbst. Ich ziehe es vor, in der folgenden Darstellung die beiden ausser unserem Auge liegenden Flächen an die Stelle der Netzhaut und des Netzhautbildes treten zu lassen, weil jene ein richtigerer Ausdruck unseres thatsächlichen Bewusstseins sind, und weil bei der directen Eintragung aller Orte in die beiden Kugelfelder die Zweideutigkeit des Ausdrucks vermieden wird, die bisher so oft in die Irre geführt hat, als wüssten wir etwas von unserer Netzhaut, deren Grösse und Ausdehnung, wenn gesagt wird, dass wir die Lage der Objecte vor uns beurtheilen nach der Stelle der Netzhaut, welche getroffen wird. Es ist übrigens ganz gleichgiltig für alle Constructionen, die an den Kugelflächen gemacht

werden, wie gross wir ihren Radius nehmen, nur müssen wir bei endlichem Radius die Visirlinien ersetzen durch Linien, die ihnen parallel durch den Drehpunkt des Auges gehen. So können wir den Radius der Kugelflächen auch negativ nehmen, das heisst die Kugelflächen hinter den Drehpunkt legen, wo die Netzhaut und das Netzhautbild liegen. Wir können eine solche Kugelfläche, welche in der Gegend der wirklichen Netzhaut liegt, eine ideelle Netzhaut nennen, auf der ein ideelles Netzhautbild liegt. Man muss aber nicht glauben, dass eine solche schematische Netzhaut der wirklichen in ihren Dimensionen anders als in sehr grober Annäherung entspricht. Die wirkliche Netzhaut hat eine ellipsoidische Form, und das Netzhautbild der äusseren Gegenstände auf ihr ist jedenfalls durch die Asymmetrien des brechenden Apparats mannigfach verzogen. Auch halte ich für mein Theil für wahrscheinlich, dass es ganz gleichgiltig für das Sehen ist, welche Gestalt, Form und Lage die wirkliche Netzhaut hat, welche Verzerrungen das Bild auf ihr erleidet, wenn es nur überall scharf ausgeprägt ist, und weder die Form der Netzhaut noch die des Bildes im Laufe der Zeit sich merklich verändert. Im natürlichen Bewusstsein des Sehenden existirt die Netzhaut gar nicht. Weder durch die Hilfsmittel der gewöhnlichen Empfindung, noch selbst durch wissenschaftliche Versuche sind wir im Stande, von den Dimensionen und der Lage und Form der Netzhaut des lebenden Auges irgend etwas zu erfahren, ausser was wir an ihrem optischen Bilde, welches die Augenmedien nach aussen entwerfen, ermitteln können. Nur durch die Augenmedien hindurch verkehrt die Netzhaut der Regel nach mit der Aussenwelt, und existirt für diese auch gleichsam nur so, wie sie in ihrem optischen Bilde erscheint. Der Repräsentant dieses optischen Bildes ist das von uns definirte Sehfeld.

Wenn zwei helle Punkte im Sehfelde vorhanden sind bei fester Stellung des Auges, so werden zwei verschiedene Sehnervenfasern durch deren Licht erregt und es entstehen zwei Empfindungen, die durch eigenthümliche Localzeichen von einander unterschieden sein müssen, da wir sie in der Empfindung zu unterscheiden im Stande sind. Welcher Stelle der Netzhaut diese Localzeichen angehören, wissen wir von vorn herein ebenso wenig, als wo die Sehnervenfasern liegen, die sie leiten, und zu welchen Stellen des Gehirns die Erregung fortgeleitet wird. Ueber die Stelle der Netzhaut würden wir uns durch wissenschaftliche Untersuchungen allenfalls Aufschluss verschaffen können, über die den Sehnerven und das Gehirn betreffenden Theil der Frage sind wir dazu bis jetzt noch vollständig ausser Stande. Wohl aber wissen wir durch tägliche Erfahrung, wie wir den Arm ausstrecken müssen, um einen oder den andern hellen Gegenstand entweder zu berühren oder unserem Auge zu verdecken. Wir können also direct durch solche Bewegungen die Richtung im Sehfelde ermitteln, wo sich die Objecte befinden, und wir lernen direct die besonderen Localzeichen der Empfindung zu verbinden mit dem Orte im Sehfelde, in den das Object gehört. Dies ist auch der Grund, warum wir die Gegenstände trotz ihrer umgekehrten Netzhautbilder aufrecht sehen. Die Netzhautbilder kommen bei der Localisation der Objecte eben gar nicht in Betracht; sie sind nur Mittel, die Lichtstrahlen je eines Punktes des Gesichtsfeldes auf je eine Nervenfaser

zu concentriren. Wir hätten gerade ebenso viel Recht, uns darüber zu wundern, warum die Buchstaben eines gedruckten Buches nicht von rechts nach links verkehrt sind, da ja doch die metallenen Lettern, mit denen es gedruckt ist, verkehrt sind.

Es ist also richtiger zu sagen: „wir empfinden, an welchem Orte des Sehfeldes ein Object erscheint", als zu sagen: „wir empfinden den Ort der Netzhaut, auf dem es abgebildet ist". Dies letztere hat einen richtigen Sinn, insofern darunter nur gemeint ist, dass gewisse Eigenthümlichkeiten der Empfindung, nämlich ihre Localzeichen, eigenthümlich sind denjenigen Empfindungen, die durch einen bestimmten Ort der Netzhaut uns zugeleitet werden, und für die wissenschaftliche Untersuchung würden wir die localen Verhältnisse der Empfindung auch durch den Ort der Netzhaut, auf den das Licht fällt, charakterisiren können. Der Ausdruck erregt aber immer das Missverständniss, dass wir beim natürlichen Sehen irgend eine Art verborgener Kenntniss von der wirklichen Existenz und Lage der Netzhautstelle haben müssten, zu welcher Behauptung mir gar kein Grund vorzuliegen scheint.

Es ist schon früher hervorgehoben worden, dass diese Verbindung zwischen den localen Unterschieden der Empfindung und der Richtung im Sehfelde so ausschliesslich ist, dass wir gar kein Mittel haben, die locale Bestimmtheit unserer Empfindungen weder in unserem eigenen Bewusstsein, noch in der Mittheilung für andere anders zu bezeichnen, als indem wir die Stelle des Sehfeldes angeben, auf die sich die Empfindung bezieht.

Nachdem wir diese Definitionen festgestellt haben, können wir uns zu der Untersuchung wenden, wie weit unsere Fähigkeit reicht, Grössenverhältnisse im Gesichtsfelde zu beurtheilen, und welchen Täuschungen wir dabei ausgesetzt sind. Jede genauere Vergleichung zweier Raumgrössen, Linien, Winkel oder Flächen im Gesichtsfelde nimmt Augenbewegungen zu Hilfe. Wir wollen zunächst untersuchen, was wir mit Hilfe solcher Bewegungen erreichen können, und später, wie sich die Ausmessungen verändern, wenn wir die Augenbewegungen ausschliessen. Ich wähle diese Ordnung, weil mir die Abmessungen mit Augenbewegungen, wie sie die genaueren sind, so auch die ursprünglicheren zu sein scheinen.

Ueber die Genauigkeit in der Vergleichung nahe gleicher Abstände im Gesichtsfelde sind von Fechner[1] und Volkmann Versuche angestellt worden. Ersterer hat einen Zirkel auf Distanzen von 10, 20, 30, 40 und 50 halbe Pariser Decimallinien eingestellt, und die Spitzen eines zweiten Zirkels nach dem Augenmaass in dieselbe Distanz gebracht, wobei beide Zirkel, bis auf die Spitzen verdeckt in deutlicher Sehweite, 1 Pariser Fuss vom Auge entfernt, vor ihm neben einander auf dem Tische lagen. Nach jeder Einstellung wurde der Fehler derselben bestimmt. Volkmann hing neben einander drei durch Gewichte gespannte Fäden in verticaler Richtung und horizontal gegen einander verschiebbar auf, und machte nach dem Augenmaasse ihre Abstände gleich, welche wechselten

---

[1] Fechner Psychophysik. Bd .I. S. 211—236. Andere auch von Hegelmayer in Vierordt's Archiv XI, 844—853.

zwischen 10 und 240 Millimeter, wobei sein Auge 800 Millimeter von den Fäden entfernt war. Die Summe der bei den unter gleichen Umständen gemachten Versuchsreihen gemachten Fehler wurde genommen, wobei vom Sinne der Fehler abgesehen wurde, und diese Summe durch die Zahl der Beobachtungen dividirt; so erhielt er den mittleren Fehler, der bei diesen Versuchen stets nahehin den gleichen Bruchtheil der ganzen verglichenen Länge ausmachte. Die Grösse dieses mittleren Fehlers betrug im Mittel aus allen Beobachtungen in Bruchtheilen der ganzen Länge der verglichenen Linien

bei Fechner	$\frac{1}{62,1}$
bei Volkmann, frühere Versuche	$\frac{1}{88,0}$
bei demselben, spätere Versuche	$\frac{1}{101,1}$.

Es zeigte sich demnach für diese Beobachtungen das von Weber aufgestellte und von Fechner verallgemeinerte psychophysische Gesetz gültig, welches wir schon bei der Untersuchung über die Abhängigkeit der Stärke der Lichtempfindung von der objectiven Helligkeit kennen gelernt haben, wonach die unterscheidbaren Unterschiede der Empfindungsgrössen der gesammten Grösse des Empfundenen proportional sind.

Andere Versuche wurden mit viel kleineren mikrometrisch zu messenden Distanzen von Volkmann und einem seiner Schüler angestellt. Die Distanzen waren durch drei feine parallele Silberfäden, von 0,445 Millimeter Dicke und 11 Mill. Länge bestimmt, welche durch Mikrometerschrauben verschoben werden konnten. Sie wurden ebenfalls so eingestellt, dass ihre Entfernung, wechselnd von 0,2 bis 1,4 Millimeter, nach dem Augenmaass gleich gemacht wurde. Die Fehler nahmen in diesem Falle nicht mehr proportional den gemessenen Distanzen ab, sondern näherten sich einer unteren Grenze, wie zu erwarten war, da bei so kleinen Distanzen die Genauigkeit in der Unterscheidung kleinster Theile des Gesichtsfeldes, welche von der Feinheit der Netzhautelemente abhängt, mit in Betracht kommen muss. Der mittlere Fehler Δ konnte aber dargestellt werden als die Summe eines constanten und eines dem Abstande D der Fäden proportionalen Gliedes, nach der Formel

$$\Delta = v + WD$$

worin v und W zwei Constanten bezeichnen. Es ergaben sich hierbei reducirt auf 340 Millimeter Sehweite folgende Werthe dieser Constanten

	v in Millimetern	W
Volkmann horizontale Abstände	0,008210	$\frac{1}{79,1}$
Derselbe verticale Abstände	0,007319	$\frac{1}{45,1}$
Appel horizontale Abstände	0,005331	$\frac{1}{164,5}$
Derselbe ebenso später	0,008548	$\frac{1}{85,3}$.

Die Werthe von *W* in den beiden ersten Reihen zeigen, dass die Vergleichung verticaler Abstände viel unvollkommener ist, als die Vergleichung horizontaler. Dasselbe beobachtet man übrigens auch sogleich, wenn man eine Reihe verticaler und horizontaler Linien auf Papier zieht und sie nach dem Augenmaasse zu halbiren sucht, und dann die abgetheilten Längen mit dem Maassstab vergleicht. Die Fehler in der Halbirung verticaler Linien werden im Allgemeinen viel grösser, als die von horizontalen. Wenn man sich selbst beobachtet bei der Vergleichung zweier Abstände oder zweier gerader Linien, so findet man, dass kleine Unterschiede nur bemerkt werden, wenn man nach einander den Fixationspunkt bald in die Mitte der einen, bald in die Mitte der andern Linie bringt, sodass die beiden Linien nach einander auf denselben Theilen der Netzhaut abgebildet werden. Bei festgehaltenem Fixationspunkte lässt man manches als gleich durchgehn, was sich sogleich als verschieden zu erkennen giebt, wenn man mit der Richtung des Blicks in der angegebenen Weise wechselt.

Sehr viel schwieriger erweist sich die Vergleichung von horizontalen Längen mit verticalen, und es zeigt sich dabei ein constanter Fehler, indem wir nämlich geneigt sind, verticale Linien für länger zu halten als gleich lange horizontale. Man sieht dies am besten, wenn man sich bemüht, nach dem Augenmaasse ein Quadrat zu zeichnen auf einem Papiere, welches man senkrecht gegen die Gesichtslinie hält. Man macht die Höhe immer zu niedrig, und zwar, wie ich bei mir selbst finde, um $^1/_{30}$ bis $^1/_{60}$ der Grundlinie, im Mittel etwa um $^1/_{40}$; doch scheint dieses Verhältniss in verschiedenen Augen sehr zu variiren, WUNDT [1] giebt die Grösse dieser Differenz an auf ein Fünftheil.

VOLKMANN [2] hat auch Versuche angestellt über die Fehlergrössen, welche bei Schätzung des Verhältnisses zweier nicht gleichen Distanzen begangen wurden. Der Beobachter stellte eine bewegliche Linie zwischen zwei andern ein auf $^1/_{10}$, $^2/_{10}$, $^3/_{10}$, $^4/_{10}$, $^5/_{10}$ der ganzen Entfernung. Dabei zeigten sich erstens Abweichungen zwischen dem Mittel aller Einstellungen für ein gewisses Grössenverhältniss und der wirklich richtigen Einstellungen, welche VOLKMANN constante Fehler nennt, und zweitens Abweichungen von dem Mittel der Einstellungen oder variable Fehler. Die constanten Fehler machten die links liegende Distanz immer etwas zu gross im Verhältniss zur rechts liegenden. Als die zu theilende Grösse einer Pariser Linie betrug der Werth der constanten Fehler in Tausendtheilen einer Linie im Mittel aus je 40 Versuchen:

Constanter Fehler, aus je 40 Versuchen.

Ausgangspunkt von	Geforderte Verhältnisse								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Links	13,4	19,8	6,7	11,7	3,4	13,4	24,8	10,0	6,8
Rechts	—10,8	— 9,3	—20,0	—12,0	— 6,2	— 4,5	— 9,5	—19,7	—19,4
Unten	+ 2,9	+ 2,9	—12,1	— 5,9	—13,5	— 2,2	+ 7,2	+ 5,1	+11,6
Oben	— 5,0	— 4,7	— 6,0	+ 3,9	+ 9,7	+13,6	—17,4	— 7,3	—10,8

[1] Vorlesungen über Menschen- und Thierseele, S. 255.
[2] Berichte der Kön. Sächs. Ges. vom 7. August 1858.

In den beiden oberen Reihen lag die zu theilende Distanz horizontal, in den beiden unteren vertical. Als Ausgangspunkt ist das Ende derselben angegeben, von wo der abzumessende Theil angefangen wurde abzumessen.

Die variablen Fehler wurden nach ihrer absoluten Grösse ohne Rücksicht auf das Vorzeichen addirt und dann durch die Anzahl der Beobachtungen dividirt. Es ergaben sich nahehin gleiche mittlere Grössen derselben für complementäre Verhältnisse. Ihre Grösse war im Mittel von je 160 Beobachtungen (für 0,5 nur 80 Beobachtungen)

Mittelwerthe der variablen Fehler.

Zu theilende Distanz	Gefordertes Verhältniss				
	0,1 und 0,9	0,2 und 0,8	0,3 und 0,7	0,4 und 0,6	0,5
Horizontal	6,73	4,36	3,01	2,64	1,11
Vertical	7,09	9,01	9,95	8,61	7,98.

Absolut grösser, aber relativ etwas kleiner wurden die Fehler in einer anderen Versuchsreihe, wo der ganze zu theilende Abstand 100 Millimeter betrug, und die Grenzen der betreffenden Abstände durch drei feine von dem Maassstabe herabhangende Menschenhaare angezeigt waren. Die Grössen sind in Zehntelmillimetern angegeben, so dass die Einheit wieder ein Tausendtheil der zu theilenden Grösse beträgt.

Constante Fehler.

Ausgangspunkt von	Gefordertes Verhältniss								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Links	2,35	7,45	0,5	10,7	4,15	12,4	11,3	0,85	4,10
Rechts	—1,8	+0,6	—11,1	— 5,2	—4,0	— 7,5	— 5,5	—4,4	—2,8

Mittelwerthe der variablen Fehler.

Für den Bruch			0,1	und	0,9	= 2,6
„	„	„	0,2	„	0,8	= 5,6
„	„	„	0,3	„	0,7	= 7,9
„	„	„	0,4	„	0,6	= 6,5
„	„	„	0,5	„		= 2,8.

Wenn nun nicht blos gleiche Entfernungen als gleich erkannt, sondern ungleiche Entfernungen ihrem Grössenverhältniss nach erkannt werden sollen, so ist es nöthig, diejenige Linie zwischen den Endpunkten der gegebenen Entfernung zu bestimmen, welche als Maass der Entfernung zu benutzen ist. In der Ebene ist dies die gerade Linie. Im Blickfelde, als einer gekrümmt erscheinenden Fläche, können gerade Linien nicht gezogen werden, und selbst um kürzeste Linien auf der Fläche zu ziehen, müssten wir eine genaue Anschauung von der Krümmung der Fläche des Blickfeldes mitbringen, die wir nicht bestimmt genug haben. Wenn man sich das Blickfeld als eine Kugelfläche vorstellt, deren Mittelpunkt der Drehpunkt des Auges ist, wie dies zum Zwecke wissenschaftlicher geometrischer Erörterungen gewöhnlich geschieht, so könnte man vermuthen, dass objectiv gerade Linien der Aussenwelt, die sich als grösste Kreise in das kugelförmige Blickfeld projiciren, als kürzeste Linien, als Linien ohne

Krümmung in dem Gesichtsfelde erscheinen müssten. Das ist aber nur unter gewissen Bedingungen der Fall.

Wenn wir eine gerade Linie betrachten, zum Beispiel die Kante eines Lineals, und durch das Augenmaass zu ermitteln suchen, ob sie wirklich gerade oder gekrümmt sei, so zeigt sich das Urtheil nach der schon im vorigen Paragraphen erwähnten Täuschung abhängig von der Richtung des Auges im Kopfe. Halten wir das Lineal horizontal und zu niedrig, so erscheint die Kante nach oben concav; halten wir es zu hoch, so erscheint sie nach unten concav. Dass dabei eine Augentäuschung stattfindet, erkennt man schnell, wenn man das Lineal so umwendet, dass die Kante statt nach oben nun nach unten sieht. Dann müsste eine wirklich nach unten concave Kante jetzt nach oben concav sein, und umgekehrt. Aber wenn das Lineal richtig und gerade ist, bleibt die Augentäuschung bestehen. Hält man das Lineal aber so, dass die Mitte seiner Kante der Primärstellung entspricht, so erscheint diese gerade, wenn sie wirklich gerade ist. Nun wählt man allerdings durch einen natürlichen Trieb die Primärstellung, wenn man über eine solche Frage durch das Augenmaass entscheiden soll, doch ist die Sicherheit, mit der man diese Stellung einhält, nicht sehr gross. Dagegen finde ich, dass ich ziemlich geringe Krümmungen von Linealen in der Primärstellung erkennen kann, wenn ich das Lineal umwende, so dass ich bald die eine, bald die andre Fläche desselben gegen mich kehre. Auf diese Weise konnte ich bei einem Elfenbeinlineale von 200 Millimeter Länge, welches convex war und dessen Krümmung in der Mitte nur 0,35 Millimeter von der geraden Linie nach aussen bauchte, dessen Krümmungsradius demnach etwa 14 Meter betrug, die Krümmung mit dem Auge richtig erkennen, ebenso bei einem anderen concaven Lineale, welches in der Mitte ein halbes Millimeter abwich. So genaue Bestimmungen sind aber nicht bei fixirtem Blicke, sondern nur mit Hilfe der Augenbewegungen möglich.

Wir sind ferner im Stande, mit grosser Genauigkeit zu entscheiden, ob gerade Linien einander parallel sind oder nicht. Um das zu ermitteln, lassen wir den Blick an einer von ihnen, oder in der Mitte zwischen ihnen hin und hergehen, und erkennen dann mit ziemlich grosser Genauigkeit, ob ihr Abstand nach dem einen Ende hin ebenso gross, oder ob er grösser ist als am andern Ende. So sind wir ferner auch mit verhältnissmässig grosser Sicherheit im Stande zu erkennen, dass zwei Winkel, deren Schenkel einander parallel gerichtet sind, einander gleich gross sind, weil wir eine kleine Abweichung vom Parallelismus der Schenkel leicht erkennen und daraus dann auf Ungleichheit der Winkel schliessen. Nach Versuchen von E. Mach [1] geschieht die Beurtheilung des Parallelismus genauer für horizontale und verticale Linien als für geneigte. Dagegen ist die Vergleichung solcher Winkel, deren Schenkel nicht parallel mit einander sind, nicht nur sehr unsicher, sondern auch ziemlich regelmässigen constanten Fehlern unterworfen.

Verhältnissmässig die einfachste Aufgabe dieser Art ist, zu entscheiden, ob ein Winkel seinem Nebenwinkel gleich und also ein Rechter sei. Wenn

[1] Sitzungsber. d. K. K. Akad. zu Wien, 1861, Bd. XLIII. 215—224.

von zwei sich rechtwinkelig kreuzenden geraden Linien die eine horizontal, die andere vertical ist, so erscheinen für das rechte Auge der meisten Individuen die nach rechts oben und links unten liegenden rechten Winkel wie stumpfe, die beiden andern wie spitze Winkel. Für das linke Auge umgekehrt erscheinen die dem rechten Auge stumpf erscheinenden Winkel spitz, die spitzen stumpf. Dabei ist zu beachten, dass man beide Augen nach einander senkrecht gegen die Fläche der Zeichnung auf den Kreuzungspunkt der Linien einstellen muss. Versucht man dagegen nach dem Augenmaasse zu einer gegebenen Horizontallinie eine Verticale zu ziehen, so weicht deren oberes Ende um etwa einen Grad nach rechts herüber, wenn man mit dem rechten Auge sehend die Zeichnung gemacht hat, und nach links, wenn es mit dem linken Auge geschah. So stellt *Fig. 169* ein für mein rechtes Auge scheinbar richtiges rechtwinkeliges Kreuz der Linien *ab* und *cd* vor, während die Linienstücke γ und δ die Lage der wirklich richtigen Verticalen bezeichnen. Sehe ich mit dem linken Auge dieselbe Zeichnung an, so erscheint mir das obere Ende von *cd* im Gegentheil übertrieben nach rechts geneigt.

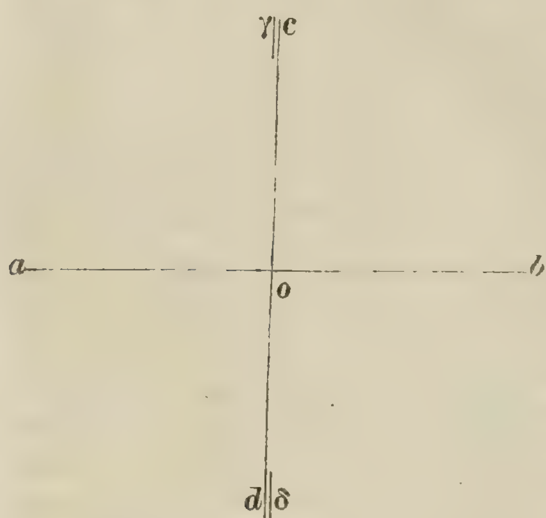


Fig. 169.

Die Grösse des Irrthums, den man betreffs der rechten Winkel begeht, hängt von der Neigung ihrer Schenkel gegen den Netzhauthorizont ab. Ich sehe rechte Winkel richtig mit dem rechten Auge, wenn das obere Ende des einen Schenkels um etwa 18 Grad von der Verticale nach links abweicht, mit dem linken Auge, wenn es um etwa ebenso viel nach rechts abweicht. Dagegen erscheint der Unterschied am grössten, wenn die Schenkel um 45 Grad von der zuletzt genannten Lage aus gedreht werden, wobei die nach rechts und links geöffneten Winkel etwa wie Winkel von 92°, die nach oben und unten gekehrten wie 88° erscheinen.

Wenn der eine Schenkel horizontal liegt, erscheinen als rechte Winkel für meine Augen solche von 91°,2 und 88°,8; bei Volkmann[1] beträgt der für das linke Auge 91°,1, für das rechte 90°,6; doch hat letzterer Beobachter bei diesen Versuchen nicht ein Kreuz beobachtet, sondern eine einzelne Linie bald horizontal, bald vertical zu stellen gestrebt; die einzelnen Beobachtungen sind dabei je 60 Mal wiederholt worden.

Ebenso finde ich, dass man auffallend grosse Fehler macht, wenn man einen Winkel von 30 bis 45 Grad zeichnet, dessen einer Schenkel horizontal liegt, und sich dann bemüht nach dem Augenmaasse eine dritte, der Verticalen nähere Linie durch den Scheitel des genannten Winkels zu ziehen so, dass ein zweiter Winkel entsteht, der jenem ersten gleich sei. Man macht diesen zweiten regelmässig beträchtlich zu gross. Wenn der erste Winkel 30 Grad

[1] Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig, 1864. Heft 2. S. 224—225.

betrug, machte ich den zweiten grösser als 34°, gleichviel ob ich mit dem rechten oder linken Auge hinsah, und ob der Winkel sich nach rechts oder links öffnete. Drehte ich die Figur aber so, dass der zuletzt gezeichnete Schenkel nun horizontal lag, so erschien der Grössenunterschied übertrieben.

Dahin gehört auch die Thatsache, dass in einem richtig gezeichneten gleichseitigen Dreieck, dessen eine Seite horizontal liegt, der Winkel an der Spitze immer kleiner erscheint, als die Winkel an der Basis.

Fragen wir nun, wie ist es überhaupt möglich, dass Raumgrössen, die verschiedenen Theilen des Sehfeldes angehören, mit einander verglichen werden können, so lehren uns die oben erwähnten Selbstbeobachtungen schon eine Methode der Vergleichung, so oft besagte Raumgrössen so liegen, dass sie nach einander auf demselben Theile der Netzhaut, und zwar am besten auf ihrer Mitte, so abgebildet werden können, dass ihre entsprechenden Punkte nach einander auf dieselben Punkte der Netzhaut fallen. In der That ist dies das Verfahren, welches wir anwenden, um nach dem Augenmaasse zum Beispiele die Länge zweier geraden Linien A und B, die einander parallel sind, zu vergleichen. Wir richten den Blick erst auf die Mitte von A, dann auf die Mitte von B, dann wieder von A und so fort, und suchen zu ermitteln, ob wir in beiden Fällen ganz denselben Eindruck erhalten, d. h. ob dieselben Netzhautpunkte in der selben Erstreckung von den Bildern beider Linien getroffen werden. Dabei brauchen wir offenbar von der Form und Länge des Bildes auf der Netzhaut nichts zu wissen. Die Netzhaut ist wie ein Zirkel, dessen Spitzen wir nach einander an die Enden verschiedener Linien ansetzen, um zu sehen, ob sie gleich lang sind, oder nicht, wobei wir über die Entfernung der Zirkelspitzen und die Form des Zirkels nichts weiter zu wissen brauchen, als dass sie unverändert geblieben sind.

Ein Unterschied aber ist zwischen der Vergleichung mittels der Netzhaut und der mittels des Zirkels. Die Verbindungslinie der Zirkelspitzen können wir nach jeder Richtung hinwenden, das können wir aber dem Gesetze der Augenbewegungen zufolge nicht thun mit der Verbindungslinie je zweier Netzhautpunkte, wenn wir nicht ausgiebige Bewegungen mit dem Kopfe machen wollen, welche wegen der damit verbundenen grösseren Anstrengung lange nicht so häufig und so schnell wechselnd gemacht werden können, und wenn sie gemacht werden, meist eine wesentliche Veränderung des Gesichtspunkts, des Ortes unseres Auges im Raume und somit der ganzen perspectivischen Ansicht zu Folge haben. Wenn ab und $\alpha\beta$ zwei Paare von Punkten im Gesichtsfelde sind, deren Entfernung verglichen werden soll, und ich etwa zuerst a fixirt habe, so dass sich a auf dem Centrum der Netzhautgrube A, und der Punkt b auf dem Netzhautpunkte B abgebildet hat, wenn ich dann das Auge wende und α fixire, so dass α auf dem Centrum der Netzhaut A abgebildet ist, so wird der Netzhautpunkt B bei der neuen Stellung der Gesichtslinie eine ganz bestimmte Lage haben, die ich ohne Bewegung des ganzen Kopfes nicht willkührlich ändern kann, und die Richtung der Linie $\alpha\beta$ im Gesichtsfelde muss eine ganz bestimmte sein, damit sich β auf B abbilden kann.

Wenn a, b, α und β nahe genug dem Hauptblickpunkte liegen, dass wir

das sie umschliessende Stück des Gesichtsfeldes als Ebene betrachten können, so können die Linien ab und $\alpha\beta$ nach einander auf denselben Netzhautpunkten nur dann abgebildet werden, wenn sie einander parallel sind. Eben deshalb können nun die Längen zweier paralleler Linien gut und sicher miteinander verglichen werden, während wir bei der Vergleichung nicht paralleler Linien, selbst wenn sie einander nahe liegen, grossen Irrthümern ausgesetzt sind.

In derselben Weise kann, wie schon oben angeführt ist, der Parallelismus zweier Linien durch die Gleichheit ihrer Abstände an allen Stellen, und die Gleichheit von Winkeln mit parallelen Schenkeln gut beurtheilt werden.

Wenn nun eine Linie im Gesichtsfelde als gerade anerkannt werden soll, und sie geht durch den Hauptblickpunkt, so können wir, indem wir das Auge an ihr hingleiten lassen, ebenfalls ihre einzelnen Theile alle nach einander auf derselben Linie der Netzhaut abbilden. Wir haben im vorigen Paragraphen gesehen, dass wenn wir von einem geraden Linienstück, welches den Hauptblickpunkt schneidet, ein Nachbild entwickeln und den Blick in Richtung des Meridians wandern lassen, in welchem jenes Linienstück liegt, das Nachbild immer mit jenem Meridiane zusammenfällt. Das Nachbild bezeichnet bei jenen Versuchen die Projectionen jener Netzhautstellen in das Gesichtsfeld, welche den Eindruck des linienförmigen Objectes empfangen haben, und es folgt aus diesem Versuche, dass alle Theile eines solchen Meridians nach einander auf denselben Netzhautpunkten abgebildet werden können.

Indem also das Auge einem solchen Meridiane des Sehfeldes folgt, verschiebt sich die entsprechende Linie des Netzhautbildes auf der entsprechenden Linie der Netzhaut selbst, indem beide fortdauernd congruent zusammenfallen, und vor dem Auge verschiebt sich das Sehfeld gegen das Blickfeld so, dass der betreffende Meridian des Sehfeldes sich in dem des Blickfeldes und stets mit ihm zusammenfallend verschiebt.

Dergleichen Linien im Blickfelde, deren Bild sich in sich selbst verschiebt, sind nun auch die im vorigen Paragraphen (Seite 60) erwähnten Directionskreise oder Richtkreise, welche alle durch den Occipitalpunkt des Blickfeldes hindurchgehen. Dort ist nachgewiesen worden, dass, wenn ein linienförmiges Nachbild bei Fixirung eines Punktes eines solchen Richtkreises mit seiner Richtung congruirt, es auch in allen anderen Punkten mit ihm congruirt. Da das Nachbild auf der Netzhaut festliegt, so wird dadurch auch constatirt, dass die Linienelemente eines solchen Richtkreises sich, wenn wir ihn mit dem Blicke durchlaufen, fortdauernd auf derselben Netzhautlinie abbilden.

Dass ein linienförmiges Nachbild von geringer Länge mit denjenigen andern Directionskreisen congruirt, welche im Occipitalpunkte dieselbe Tangente haben, ist ebenfalls an der citirten Stelle schon bemerkt worden.

Durch die erwähnten Eigenthümlichkeiten bekommen nun die Richtkreise für das Auge eine ganz besondere Bedeutung. Die gerade Linie in der Ebene zeichnet sich dadurch vor allen anderen aus, dass jedes Stück derselben jedem anderen Stücke congruent ist, wie man die beiden auch zusammenlegen mag. Die Eigenschaft der Congruenz jedes Theils mit jedem und die damit zusammenhängende Verschiebbarkeit der Linie in sich selbst theilt mit der geraden

Linie nur noch der Kreis. Aber zwei Kreisbögen von gleicher Länge und Krümmung müssen schon in einer bestimmten Weise zusammengelegt werden, um zu congruiren. Man kann ihre Enden auch so aufeinander legen, dass die Linienstücke selbst nicht congruiren. Auf dieser Eigenschaft der geraden Linie beruht auch wesentlich ihre Bedeutung als Längenmaass. Denn dafür können wir nur eine Linie gebrauchen, die eindeutig bestimmt ist, wenn ihre Endpunkte bestimmt sind, und deren jeder Theil congruirend auf jeden andern gelegt werden kann.

Im Blickfelde giebt es nun nur eine Art von Linien, an denen wir durch einen unmittelbaren Act der Empfindung constatiren können, dass sie in sich selbst verschiebbar und sich selbst also in allen ihren Theilen congruent seien; das sind, wie die vorausgehende Erörterung zeigt, unter Voraussetzung des Listing'schen Gesetzes, die Richtkreise. Zwar können auch andere Kreise im Blickfelde erscheinen, die wir für in sich selbst verschiebbar erklären müssen, aber wir können dies nur durch Messungen und Schlüsse, nicht durch einen unmittelbaren Act der Empfindung constatiren.

Wenn ein Auge in seinen Bewegungen abweicht vom Listing'schen Gesetze, so existiren bei einem solchen nicht nothwendig Linien, die bei Bewegungen des Blicks in ganzer Länge in sich selbst verschiebbar sind; aber man wird jedes Mal Linien construiren können, deren Elemente alle nacheinander auf demselben das Centrum der Netzhaut schneidenden Linienelemente der Netzhaut abgebildet werden können. Solche wollen wir Richtlinien des Blickfeldes nennen. Nur unter Voraussetzung des Listing'schen Gesetzes für die Augenbewegungen sind alle Richtlinien des Blickfeldes in sich selbst verschieblich und erscheinen dem Auge, dessen Blick an ihnen entlang läuft, fortdauernd in unverändertem Netzhautbilde. Es ist dies eine wesentliche Eigenthümlichkeit der dem Listing'schen Gesetze folgenden Augenbewegungen.

Gerade Linien des objectiven Raumes erscheinen im kugelförmigen Gesichtsfelde als grösste Kreise desselben. Grösste Kreise fallen mit den Richtkreisen nur zusammen, wenn sie durch den Hauptblickpunkt (die Primärstellung der Blicklinie) gehen. Dann erscheinen kurze Stücke von ihnen, wie die oben beschriebenen Versuche zeigen, als gerade Linien, sonst aber gekrümmt, und zwar entgegengesetzt der wirklichen Krümmung der Richtkreise gekrümmt.

Die Richtkreise, beziehlich Richtlinien, müssen in der That in dem flächenhaften Blickfelde die Stelle der geraden Linien, welches die Linien constanter Richtung in der Ebene sind, vertreten. Wir können mit einem kurzen Lineal in der Ebene eine beliebig lange gerade Linie ziehen, indem wir zuerst eine solche ziehen, so lang als das Lineal es erlaubt, dann das Lineal längs der gezogenen Linie eine Strecke weit verschieben und so fortfahren. Ist das Lineal genau gerade, so erhalten wir bei diesem Verfahren eine gerade Linie; ist es selbst etwas gekrümmt, so erhalten wir einen Kreis. Statt des verschiebbaren Lineals dient uns im Gesichtsfelde die mit einem linienhaften Gesichtseindruck, der unter Umständen bis zum Nachbilde gesteigert sein kann, versehene centrale Stelle des deutlichsten Sehens. Wir verschieben den Blick in Richtung dieser Linie, dabei verschiebt sich die Linie selbst und zeigt uns die Fortsetzung dieser

Richtung an. In der Ebene können wir jenes Verfahren gleich gut mit jedem geradlinigen oder bogigen Lineal ausführen, im Gesichtsfelde aber ist für jede Richtung des Blicks und der Bewegung nur eine einzige Art von Linie möglich, die sich fortdauernd in ihrer eigenen Richtung verschieben lässt.

Wir sehen also, wie durch die Augenbewegungen und ihr bestimmtes Gesetz gewisse Abmessungen im Blickfelde möglich werden. Nun finden wir aber, wie oben schon bemerkt worden ist, dass auch bei vollkommen ruhendem Auge im indirecten Sehen eine gewisse Beurtheilung der Abmessungen des Sehfeldes möglich ist, die natürlich sehr viel unbestimmter ist, als die, welche mittels des bewegten Blicks gewonnen wird, schon weil das indirecte Sehen überhaupt keine grosse Genauigkeit gewährt. Dass aber die Fähigkeit zu solcher Abmessung da sei, zeigt sich am schlagendsten an subjectiven Erscheinungen, die überhaupt nur im indirecten Sehen beobachtet werden können, wie an der Aderfigur. Wir sind im Stande, eine solche Figur nachzuzeichnen, ihre Verziehungen bei wechselnder Beleuchtungsrichtung wahrzunehmen, und haben überhaupt eine bestimmte flächenhafte Anschauung derselben, trotzdem wir nicht im Stande sind, durch Bewegungen des Auges die Lage derselben auf der Netzhaut zu verändern und die einzelnen Theile derselben mit dem Blicke zu durchlaufen. Ebenso zeigt sich bei momentaner Beleuchtung des Gesichtsfeldes durch einen Blitz, dessen Dauer zu kurz ist, als dass eine merkliche Bewegung des Auges während der Dauer der Beleuchtung ausgeführt werden könnte, dass wir im Stande sind, die Gestalt der vor uns liegenden Objecte der Hauptsache nach richtig zu beurtheilen.

Es kommen aber auch bei dieser Art der Betrachtung eigenthümliche Täuschungen des Augenmaasses vor, welche in so fern wichtig sind, als sie uns Andeutungen über die Art, wie wir zur Ausmessung des Feldes des indirecten Sehens gekommen sind, zu geben scheinen.

Erstens gehören hierher die schon vorher beschriebenen Täuschungen in der Vergleichung von Winkeln mit nicht parallelen Schenkeln und von Linien nicht übereinstimmender Richtung, weil, wie die Selbstbeobachtung lehrt, Bewegung des Auges in diesen Fällen nichts beiträgt und auch nichts beitragen kann zur Verbesserung des Urtheils. Die genannten Täuschungen treten ebenso gut ein bei strenger Fixation eines Punktes als bei wanderndem Blick.

Dazu kommt nun noch ein anderes System von Täuschungen, die ich bisher noch nirgends erwähnt gefunden habe, und welche sich beziehen auf die als ungekrümmt erscheinenden Linien des Sehfeldes und auf die scheinbare Grösse seiner peripherischen Theile. In der Ebene sind die geraden Linien gleichzeitig die kürzesten und die, welche weder nach der einen, noch nach der anderen Seite hin eine Krümmung zeigen. Auf der Kugel sind es die grössten Kreise, deren Krümmungsradius ist senkrecht zur Kugelfläche gerichtet, in der Kugelfläche selbst zeigen sie keine Krümmung. Alle Kreise dagegen, welche kleiner sind als ein grösster, erscheinen concav auf der Seite, wo das kleinere von ihnen abgegrenzte Kugelstück liegt, convex auf der entgegengesetzten Seite.

Wir können nun fragen, welches sind die ungekrümmten Linien im Seh-

felde? Sind es, wie man zunächst vielleicht vermuthen sollte, die grössten Kreise des kugelig gedachten Feldes? Davon, dass diese es nicht in allen Fällen sind, kann man sich leicht überzeugen.

Man wiederhole den früher erwähnten Versuch mit drei Sternen mit fixirtem Blicke, während früher Bewegung des Blicks über dieselben hin vorausgesetzt war. Man suche sich am Sternenhimmel drei helle Sterne, die möglichst annähernd in einem grössten Kreise liegen, was man mittels eines ausgespannten Fadens, an dem man vorbei nach den drei Sternen hinvisirt, hinreichend genau erkennen kann. Man wähle diese Sterne möglichst weit von einander entfernt; doch müssen sie hell genug sein, um auch im indirecten Sehen noch leicht erkannt und von den benachbarten kleineren unterschieden zu werden. Wenn man solche gefunden hat, fixire man den mittleren; sie werden in einer geraden Linie zu liegen scheinen, oder wenn sie nicht ganz genau in einem grössten Kreise liegen, so erkennt man richtig den Sinn und ungefähr auch die Grösse der Abweichung. Nun wähle man aber den Fixationspunkt in einiger Entfernung auf der einen oder anderen Seite der Sternenreihe, man wird sogleich und sehr deutlich die Reihe gegen den Fixationspunkt concav sehen, um desto mehr concav, je weiter entfernt der Fixationspunkt von der Reihe der drei Sterne ist. Daraus lernen wir, dass am Sternenhimmel bei unbewegter Blickrichtung ein grösster Kreis nur dann ungekrümmt erscheint, wenn er durch den Fixationspunkt geht, dagegen concav gegen den Fixationspunkt, wenn er das nicht thut. Es folgt daraus weiter, dass Linien, welche auf den peripherischen Theilen des Gesichtsfeldes ungekrümmt erscheinen sollen, in Wahrheit auf dem Himmelsgewölbe convex gegen den Fixationspunkt sein müssen.

An irdischen Objecten wird man in der Beurtheilung der Ausmessungen des Sehfeldes zwar leicht beeinflusst durch die schon vorher erworbene Kenntniss der wirklichen Ausmessungen des Objects, es gelingt aber doch auch an solchen dieselbe Täuschung wahrzunehmen.

Am zweckmässigsten ist es, sich weit über eine grosse Tischplatte zu beugen, so dass man keine erkennbaren geraden Linien mehr im Gesichtsfelde hat, nach denen man sich richten könnte, und einen Punkt der Platte zu fixiren. Wenn man dann in einiger Entfernung vom Fixationspunkte drei Papierschnitzelchen oder andere helle Objecte hinlegt und dieselben in eine gerade Linie zu richten strebt, so findet man stets, sobald man den Blick auf die Papierchen selbst richtet, dass man sie in einen gegen den früheren Fixationspunkt convexen Bogen gelegt hat.

Wenn man über dieselbe Tischplatte einen langen von zwei parallelen Linien begrenzten und etwa drei Zoll breiten Papierstreifen legt und dessen Mitte fixirt, so bemerkt man, dass seine Enden im indirecten Sehen schmaler als die Mitte erscheinen, und dass er von zwei mit ihrer Concavität gegen einander sehenden Bögen begrenzt erscheint.

An geraden Linien von geringerer scheinbarer Erstreckung bemerkt man die Krümmung meistentheils nicht, weil wir viel mehr geneigt sind, sie als gerade Linien der körperlichen Objecte, denn als grösste Kreise des Gesichtsfeldes zu betrachten und zu deuten.

Während nun grösste Kreise concav gegen den Fixationspunkt erscheinen, wenn sie nicht durch diesen selbst hindurchgehen, so erscheinen im Gegentheil Kreise, welche Parallelkreise zu einem durch den Fixationspunkt gehenden grössten Kreise sind, convex gegen den genannten Punkt. Man biege, um dies zu prüfen, einen drei bis fünf Zoll breiten Papierstreifen zu einem Halbcylinder und bringe das Auge in dessen Axe. Fixirt man nun die Mitte des Papierstreifens, so scheint derselbe nach beiden Enden hin breiter zu werden und von zwei mit der Convexität gegen einander gekehrten Bögen begrenzt. Die seitlichen Theile des Streifens befinden sich in derselben Entfernung vom Auge, wie die Mitte desselben, und erscheinen deshalb, geometrisch betrachtet, unter demselben Gesichtswinkel, wie die Mitte, während sie scheinbar im Sehfelde sich grösser darstellen als die Mitte des Streifens.

Denken wir uns den Fixationspunkt am Horizont gelegen, über ihm befinde sich in der Höhe h ein Punkt, durch den im indirecten Sehen eine scheinbar ungekrümmte horizontal verlaufende Linie gezogen werden soll. Der grösste Kreis, welcher rechts und links in gleicher Entfernung den Horizont schneidet und in der Entfernung h unter dem Occipitalpunkt des Beobachters hindurchgeht, erscheint nach unten concav. Ein wirklich überall horizontal verlaufender Parallelkreis des Horizontes, der in der Entfernung h auch über dem Occipitalpunkte hinweggeht, entspricht ebenfalls nicht der Aufgabe, er erscheint convex nach unten. Da der erste dieser Kreise nach unten concav, der zweite convex erscheint, so muss die scheinbar ungekrümmte Linie zwischen diesen beiden liegen, und wenn sie ein Kreis ist, so muss sie weniger als h vom Occipitalpunkt entfernt über oder unter diesem hindurchgehen. Da können wir nun an die Richtkreise des Blickfeldes denken, die durch den Occipitalpunkt selbst hingehen. Versuchen wir es mit diesen.

Zu dem Ende habe ich die Richtkreise des Blickfeldes, welche mit der durch den Fixationspunkt gehenden verticalen und horizontalen Linie übereinstimmende Richtung haben, auf eine ebene Tafel projicirt; sie erscheinen dabei als Hyperbeln. Um sie im ganzen Sehfelde, auch in den indirect gesehenen Theilen desselben möglichst deutlich erscheinen zu lassen, habe ich die Felder des von den Curven gebildeten Gitters schachbrettartig schwarz und weiss gemalt, wie *Fig. 170* (S. 553) in verkleinertem Maassstabe $^3/_{16}$ zeigt; A bezeichnet die in gleichem Verhältniss verkleinerte Entfernung, in der das Auge des Beobachters von der Tafel, der Mitte derselben gerade gegenüberstehend, entfernt sein muss. Der Mittelpunkt der Tafel wird fixirt. Das Orginal der *Fig. 170* hatte ich an der Wand des Zimmers, seine Mitte in der Höhe meiner Augen über dem Boden befestigt; ein rechtwinkliges Winkelmaass, dessen Katheten die Länge der für das Auge verlangten Entfernung von 20 Centimeter hatten, diente zur Controlle dieses Abstandes, indem man eine seiner Katheten an die Tafel anlegte und die Spitze des gegenüberliegenden Winkels den äussern Augenwinkel berühren liess.

In der That erscheinen nun die als Hyperbeln [1] projicirten Richtkreise des

---

[1] Die Gleichung dieser Hyperbeln ist im vorigen Paragraphen unter 3c) und den folgenden Nummern ge-

Blickfeldes unter diesen Umständen im Gesichtsfelde als gerade Linien, oder wenigstens als Linien, die nicht in der Fläche des Sehfeldes gekrümmt sind. Die einzelnen Verticalreihen und Horizontalreihen schwarzweisser Felder sehen überall gerade und überall gleich breit aus, so lange man unverwandt den Mittelpunkt der Zeichnung fixirt. Natürlich erkennt man aber die Krümmung der seitlich gelegenen Felderreihen, sobald man den Blick nach ihnen hinwendet. Hierbei tritt eine eigenthümliche Täuschung ein. Ich sehe nämlich, so wie ich den Blick wandern lasse, die Zeichnung gewölbt, wie eine flache Schüssel, so dass die Krümmung der Hyperbeln wie eine Krümmung nach der Fläche erscheint und in dieser gekrümmten Fläche die Linien als grösste Kreise (oder kürzeste Linien) erscheinen. Es wird durch diese Anschauung der Widerspruch zwischen directem und indirectem Sehen einigermassen aufgehoben. Nach den im Gesichtsfelde selbst gelegenen Richtungen erscheinen die Hyperbeln nicht gekrümmt, nur das Gesichtsfeld selbst erscheint gekrümmt.

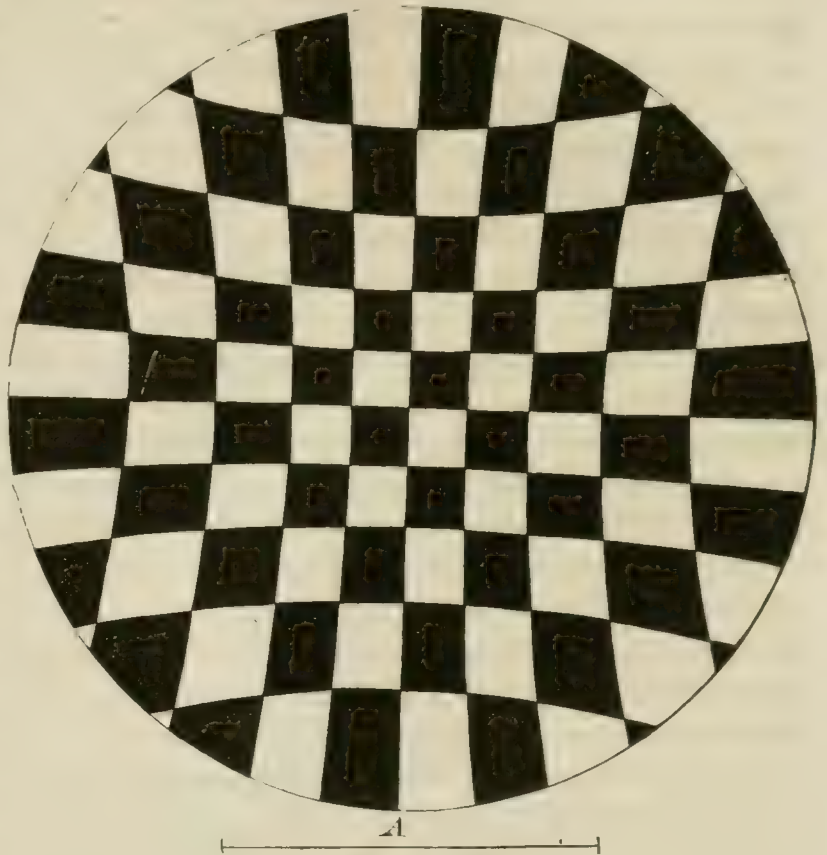


Fig. 170.

Man muss also wohl darauf achten, dass man bei dieser Beobachtung den Blick fest auf den Mittelpunkt der Tafel gerichtet hält. Sollte man sich von der Vorstellung ihrer wirklichen Gestalt nicht so schnell frei machen können, so erleichtert es die Täuschung, wenn man dicht vor das Auge eine Linse hält, in deren Brennpunkt die Tafel liegt. Freilich erscheinen die peripherischen Theile der Tafel dadurch etwas verzerrt; die Brechung in der Linse vergrössert bei sehr schiefem Einfall der Strahlen die Krümmung der Hyperbeln; aber der grössere mittlere Theil der Tafel wird durch die Linse, wie in unendlicher Entfernung liegend gesehen und dadurch die Abstraction von seiner wahren körperlichen Gestalt begünstigt.

Am vollkommensten gelingt die Täuschung, wenn man den Mittelpunkt der Tafel so lange fixirt, bis ein kräftiges Nachbild entwickelt ist und man dies mit geschlossenen Augenlidern gegen das helle Fenster gewendet betrachtet.

geben; die Abstände derselben in der mittleren Horizontale und Verticale sind so gewählt, dass sie gleichen Gesichtswinkeln entsprechen.

Ich verfuhr weiter so, dass ich anfangs mein Auge weiter als 20 Centimeter von der Tafel entfernte, wobei die rechts und links, oben und unten gelegenen Hyperbeln gekrümmt erschienen, und mich dann allmälig näherte, bis sie mir gerade geworden waren, dann mass ich den Abstand meines Auges von der Tafel mittels des erwähnten Winkelmaasses. Ging ich noch näher heran, so fingen die Hyperbeln an, sich scheinbar nach der entgegengesetzten Seite zu krümmen, als nach der sie wirklich gekrümmt waren. Dabei fand ich fast stets für die Entfernung meines Auges von der Tafel 20 Centimeter, wenn ich auf die Horizontallinien der Tafel achtete und diese gerade zu sehen trachtete, und auch für die mittleren Verticalstreifen stimmte es gut. Für die äusseren, besonders die nach der Schläfenseite liegenden Verticalstreifen dagegen war ich geneigt, eine der Tafel etwas nähere Stellung zu wählen. Deren wirkliche Krümmung schien in der Entfernung von 20 Centimeter, für die die Tafel berechnet war, noch nicht ganz aufgehoben zu sein.

Auch bei schief gehaltenem Kopfe, wobei die Linien der Tafel auf schräg liegende Meridiane der Netzhaut fielen, blieben die Erscheinungen dieselben.

Daraus geht also hervor, dass so weit die Unbestimmtheit des indirecten Sehens und des entsprechenden Augenmaasses zu beurtheilen erlaubt, die Richtlinien des Blickfeldes, wie sie im Sehfelde bei fixirtem Hauptblickpunkte erscheinen würden, die scheinbar ungekrümmten, also auch scheinbar kürzesten Linien des Sehfeldes sind.

Diese besondere Gestalt der kürzesten Linien im Sehfelde hat nun noch weitere Folgen für dessen scheinbare Gestalt und die scheinbare Grösse der Objecte, wie schon vorher bemerkt wurde. Man denke sich den horizontalen Meridian des Sehfeldes gezogen und 10° über dessen Mitte in horizontaler Richtung eine Richtlinie. Diese trifft mit jenem Meridian in 180° Entfernung hinter dem Kopfe des Beobachters zusammen und tangirt ihn dort; in 90° Entfernung aber an den Rändern des Gesichtsfeldes ist die Richtlinie nur noch um 5° senkrecht entfernt von dem genannten Meridiane, und da die beiden Kreise im Sehfelde als parallele Linien erscheinen, so erscheint der senkrechte Abstand beider von 5° am Rande ebenso gross wie der von 10° in der Mitte, und in gleicher Weise erscheinen auch an anderen Stellen des Randes des Sehfeldes die diesem Rande parallelen Dimensionen der Bilder relativ zu gross.

Dies zeigt sich nun auch in folgenden Versuchen. Man stelle sich so, dass man zur Seite um etwa 90° vom Fixationspunkt entfernt eine weisse Thür in einer dunklen Wand, oder einen dunklen Baum vor der hellen Himmelsfläche hat, und beachte, wie hoch diese im indirecten Sehen erscheinen. Man wende dann Auge und Kopf direct nach diesen Gegenständen hin, so wird man finden, dass sie viel niedriger erscheinen, und dass im Gegensatz zu der verminderten Höhe ihre Breite viel mehr heraustritt. Berge am Rande des Gesichtsfelds erscheinen in ähnlicher Weise höher und steiler, als wenn man direct hinblickt.

Andererseits lege man einen weissen Bogen Papier vor sich auf einen dunklen Fussboden und sehe horizontal gerade aus, so dass das Papier am untern Rande des Gesichtsfeldes erscheint, es wird relativ zu breit von rechts nach links erscheinen und sich scheinbar zusammenziehen, sobald man direct hinblickt.

Während so die der Peripherie des Sehfeldes parallelen Bögen vergrössert erscheinen, erscheinen die peripherischen Theile der radial verlaufenden Linien etwas verkleinert. Die Hyperbeln der *Fig. 170* sind so construirt, dass aus der Entfernung *A* gesehen die Scheitel der horizontal und die der vertical verlaufenden Hyperbeln um gleiche Gesichtswinkel von je 10 Grad von einander abstehen. Wenn also die Hyperbeln als gerade Linien erscheinen, so sollten die schwarzen und weissen Felder alle als gleich grosse Quadrate erscheinen. Das ist aber nicht der Fall; vielmehr erscheinen die von der horizontalen Mittellinie weit nach oben und nach unten gelegenen Quadrate zu niedrig gegen ihre Breiten. Weniger deutlich finde ich es, dass die nach rechts und links gelegenen vielleicht etwas zu schmal in ihrer Breite erscheinen. Doch ist überhaupt diese Vergleichung der Grössen direct und indirect gesehener Objecte sehr unvollkommen.

Eine farbige kreisförmige Pappscheibe vor einen contrastirenden Grund gehalten, erscheint daher am oberen und unteren Rande des Sehfeldes als eine elliptische Scheibe mit längerem horizontalen Durchmesser. Weniger deutlich zeigt sie sich am rechten und linken Rande des Sehfeldes als eine Ellipse mit längerem verticalen Durchmesser.

Da die Seitentheile des Sehfeldes uns etwas zu hoch und etwas zu schmal erscheinen, so besteht eine gewisse Neigung, sie für näher und schräg gestellt gegen die Gesichtslinie zu halten. Sowie man den Blick nach ihnen hinwendet, scheinen sie zurückzuweichen und sich mehr senkrecht gegen die Blicklinie zu stellen. Es ist dies eine Täuschung, die ich bei weit entfernten Objecten am Horizont, am Sternenhimmel sehr gewöhnlich sehe. Das Sehfeld erscheint mir dann nicht als eine Kugel, in deren Mittelpunkt sich das Auge befindet, sondern es erscheint stärker concav als eine solche; doch möchte ich nicht sagen, dass das monoculare Sehfeld bei unbewegtem Blicke sich uns mit einiger Entschiedenheit als eine bestimmt geformte Fläche darstellte.

In der That lassen sich nun die hauptsächlichsten der eben beschriebenen Eigenthümlichkeiten der Wahrnehmung in folgendem geometrischen Bilde zusammenfassen. Man denke sich zuerst das Blickfeld als eine Hohlkugel, in deren Mittelpunkt das Auge sich befindet. Man denke Radien von Mittelpunkte (Richtungslinien des Sehens) gezogen nach den einzelnen Objectpunkten und verlängert bis zur Kugeloberfläche. Wo diese Radien die Kugeloberfläche schneiden, ist das auf die Kugelschale projicirte Bild des Objectes. Man denke sich die Objecte entfernt und nur durch ihre Bilder auf der Kugelfläche des Blickfeldes ersetzt. Das Auge fixire den Hauptblickpunkt; ihm gegenüber liegt der Occipitalpunkt. Ich sage: das Auge sieht die Objecte im Sehfelde scheinbar so vertheilt, wie es sie nach geometrisch richtiger Projection sehen würde, wenn es die Bilder auf der Kugelfläche vom Occipitalpunkte derselben aus ansähe. Oder auch: Das Auge sieht die Gegenstände des Gesichtsfeldes wie in einer vom Occipitalpunkte aus entworfenen stereographischen Projection, diese vom Occipitalpunkte selbst aus betrachtet. Es ist dieselbe Art der Projection, wie sie bei geographischen Karten für Erdhalbkugeln immer angewendet wird.

In der That liegen die im Sehfelde als ungekrümmt erscheinenden Richt-

kreise in Ebenen, die durch den Occipitalpunkt gehen, und müssen sich also von dort gesehen als geradlinig projiciren. Tangential gerichtete Erstreckungen längs der Peripherie des Sehfeldes müssen relativ grösser als ihnen parallele Strecken in der Mitte des Feldes erscheinen, weil erstere dem Auge näher sind, als letztere. Dazu kommt nun noch, dass in der That das Sehfeld jedes Auges, welches geometrisch genommen von rechts nach links etwa 180 Grade einnimmt, scheinbar viel enger ist. Denn die äussersten nach rechts und links gelegenen Objecte, welche wir noch im indirecten Sehen erkennen können, und deren gerade Verbindungslinie durch unser Auge hindurchgeht, erscheinen uns doch noch immer, wie vor uns liegend, als ob die zu ihnen geführten Richtungslinien des Sehens einen stumpfen oder auch wohl rechten Winkel mit einander bildeten. Namentlich wenn man nach dem Himmel blickt, so dass man keine irdischen Objecte von bekannter Lage und Grösse im Sehfelde hat, so scheint das helle Feld, welches man vor sich hat, etwa den Durchmesser eines rechten Winkels von rechts nach links, noch weniger sogar von oben nach unten zu haben, wo Augenbrauen und Wange das Feld etwas verengern. Es macht den Eindruck, als blickte man aus einer gewissen Tiefe des Kopfes hervor in die Aussenwelt.

Das eben angeführte geometrische Bild möchte ich nur als solches betrachtet wissen; es fasst die Hauptzüge der scheinbaren Vertheilung im Sehfelde zusammen, aber nicht alle. Die scheinbare Verkürzung der radial gerichteten, vom Hauptblickpunkte auslaufenden Strecken nahe der Peripherie, die namentlich am untern und obern Rande des Gesichtsfeldes deutlich vorhanden ist, wird durch jenes Bild nicht gegeben. Gleiche radiale Strecken würden vielmehr in allen Theilen des Feldes gleich gross erscheinen, da sie für das im Rückenpunkt der Kugel gelegene Auge durch gleiche Peripheriewinkel gemessen werden, wie für das im Mittelpunkte befindliche durch gleiche Centriwinkel. Zu gleichen Centriwinkeln gehören aber bekanntlich gleiche Peripheriewinkel.

Auch die scheinbare Abweichung der verticalen Meridiane und des Verhältnisses der verticalen und horizontalen Dimensionen ist nicht berücksichtigt.

Wir kommen jetzt zu der Untersuchung, wie kann eine solche Ausmessung des Sehfeldes entstehen.

Im Sinne der nativistischen Theorie ist sie durch gewisse organische Einrichtungen von Geburt auf gegeben, eine Erklärung aus den Gesichtserscheinungen also nicht weiter zu suchen.

Die empiristische Theorie aber wird versuchen müssen, eine solche Erklärung zu finden. Wir setzen dabei voraus, dass das Bewegungsgesetz der Augen ausgebildet sei, was, wie im vorigen Paragraphen gezeigt wurde, ohne eine Kenntniss der Localisation der Eindrücke im Gesichtsfelde geschehen kann, in Folge des Bestrebens, die Veränderungen der Eindrücke bei Bewegung des Auges als abhängig von dieser Bewegung und nicht von Aenderungen der äusseren Objecte zu constatiren. In Wirklichkeit mag, wie schon früher bemerkt wurde, die Ausbildung des Augenmaasses sich theilweise gleichzeitig mit dem Gesetz der Bewegungen entwickeln und die ganze Einübung nicht so methodisch und in einzelne Stadien getrennt vor sich gehen, wie wir es hier der Ueber-

sichtlichkeit wegen haben darstellen müssen. Im Wesentlichen wird dadurch nichts geändert.

Wir haben im Anfange dieses Paragraphen auseinandergesetzt, wie unter Hilfe der Bewegungen des Auges zunächst ermittelt werden kann, in welcher Reihenfolge die Objecte und die durch besondere Localzeichen charakterisirten ihnen entsprechenden Netzhautpunkte in der Fläche jene des Gesichtsfeldes, diese der Netzhaut geordnet sind. Es blieb nur noch übrig, die Entstehung der bestimmten Grössenverhältnisse zu erörtern.

Wir haben dann gesehen, wie die Kenntniss gewisser Linien im Blickfelde, die in allen ihren Theilen übereinstimmende Richtung haben, und als in sich selbst verschiebbar wahrzunehmen sind, der Richtlinien, durch das ausgebildete Bewegungsgesetz der Augen gewonnen werden kann.

Wenn wir nun irgend ein Object im indirecten Sehen wahrnehmen, von ihm also einen begrenzten Eindruck auf einen seitlichen Theil der Netzhaut erhalten haben, und dann den Blick jenem Objecte zuwenden, so erhalten wir hinterher einen Eindruck desselben Objects mit seiner gleichen scheinbaren Grösse auch auf dem Centrum der Netzhaut, und können also aus Erfahrung allmälig lernen, welchem centralen Eindrucke ein gewisser peripherischer in Qualität und Grösse gleich gilt. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, auch mittels des indirecten Sehens, soweit dessen Genauigkeit ausreicht, Objecte ihrer Form und scheinbaren Grösse nach beurtheilen zu lernen.

Neben der Grösse und Form wird aber auch eine Vergleichung der Richtung des erst indirect und dann direct gesehenen Objectes mit dem zuerst direct gesehenen eintreten, es wird wahrgenommen werden, welche Linien beider Objecte sich auf denselben Meridianen der Netzhaut abbilden. Diese Vergleichung der Lage wird allerdings etwas verschieden ausfallen müssen, je nachdem wir von der Primärstellung oder von einer Secundärstellung des Blicks ausgehen, obgleich das für normalsichtige Augen geltende Listing'sche Gesetz die Summe dieser Verschiedenheiten so klein als möglich macht. Im Mittel aller Fälle aber wird die Vergleichung so ausfallen, als wäre das erste Object in der mittleren Stellung, das heisst in der Primärstellung fixirt worden. Ausserdem ist schon früher hervorgehoben worden, dass die Primärstellung als die bequemste und zur Orientirung vortheilhafteste am meisten vom Auge eingenommen wird, und dass wir Bewegungen, welche mit Drehung um die Blicklinie verbunden sind, zu vermeiden suchen. So werden wir also durch Erfahrung kennen lernen können, welche Richtungen in den Seitentheilen des Sehfeldes übereinstimmen, mit den durch den Fixationspunkt gezogenen Linien, und diese Uebereinstimmung wird sich als Regel so feststellen, wie sie stattfindet, wenn der Fixationspunkt auch Hauptblickpunkt ist, das heisst *sämmtliche Linienelemente ein und derselben Richtlinie werden im Sehfelde übereinstimmende Richtung zu haben scheinen, und sämmtliche Richtlinien, die im Occipitalpunkt einen und denselben Meridian des Sehfeldes tangiren, werden übereinstimmende Richtung haben.*

Nun tritt aber diese Bestimmung der Linien von übereinstimmender Richtung in Widerspruch mit den Bestimmungen der scheinbaren Grösse, welche bei

Vergleichung der direct und indirect gesehenen Objecte anzustellen sind. Linien von übereinstimmender Richtung im Sinne unserer Definition dieses Begriffs können sich nämlich nicht schneiden, denn wo sie sich schneiden, würden sie nicht in übereinstimmender Richtung erscheinen können. Sie erscheinen uns vielmehr thatsächlich parallel und überall in gleichem Abstande. Dadurch wird es aber bedingt, wie wir oben gesehen haben, dass die tangential gerichteten peripherischen Strecken relativ zu gross erscheinen.

Dass wir bei diesen Vergleichungen die Richtung der übereinstimmenden Linien mehr berücksichtigen als die Grösse der Objecte, hängt wohl davon ab, dass wir bei undeutlichen und verwaschenen Bildern, wie die peripherischen des Sehfeldes in hohem Grade sind, Richtungen von Linien noch ziemlich gut und genau erkennen können, wenn die Form und Dimensionen des Objects nur noch sehr ungenau erkannt werden. Wenn man eine feine schwarze Linie unter Umständen betrachtet, wo man nicht für sie accommodiren kann und sie als einen verwaschenen Schattenstreifen sieht, so wird man ihre Breite gar nicht, ihre Länge nur sehr unvollkommen bemessen, ihre Richtung aber noch sehr genau mit der eines scharf gesehenen Fadens vergleichen können, indem man diesen dem Rande des Schattenstreifens parallel oder auch gerade in die Mitte des Schattens einstellt. Nun machen die Bilder in den Seitentheilen des Sehfeldes ungefähr denselben subjectiven Eindruck, wenn auch aus einem ganz andern Grunde, wie Bilder, die wegen schlechter Accommodation sehr verwaschen sind, und es scheint mir deshalb die Annahme zulässig, und wird auch, wie mir scheint, durch directe Beobachtung bestätigt, dass man die Richtung der durch sie verlaufenden Linien verhältnissmässig viel sicherer bestimmt, als die Grösse der dort befindlichen Objecte. Es wird mir wenigstens viel schwerer, mich über die Stellung zu entscheiden, die ich nehmen muss, um die äusseren Felder des Schachbrettmusters *Fig. 170* gleich breit mit den mittleren zu sehen, als es der Fall ist, wenn ich die Linien gerade gestreckt sehen will.

Dass an den äussersten Grenzen des schachbrettförmigen Feldes die Richtlinien noch etwas gekrümmt erschienen, erklärt sich daraus, dass von der Primärstellung ausgehend diese Stellen nur mit angestrengter Seitenwendung des Auges zu erreichen waren, wie wir sie gewöhnlich nicht anwenden. Um sie mit dem Blicke ohne ungewöhnliche Anstrengung erreichen zu können, musste der Blicklinie für das Centrum der Scheibe eine Wendung nach der entgegengesetzten Seite gegeben werden. Bei solcher Stellung aber würden die Richtlinien des Sehfeldes an der betreffenden Stelle der Peripherie wirklich weniger gekrümmt, als die Hyperbeln.

In dem mittleren deutlich gesehenen Theile des Sehfeldes können wir, wegen seiner geringen Ausdehnung von der Krümmung der Kugelfläche und der auf ihr gezogenen Richtlinien, absehen. Wir können in diesem Theile des Sehfeldes übereinstimmende Richtlinien als parallele gerade Linien betrachten. Hier muss auch die Vergleichung der Form, Grösse und Lage der Objecte, wenn wir sie bald indirect, bald direct betrachten, übereinstimmende Resultate geben. Hier wird also auch eine genauere Vergleichung indirect gesehener Strecken mit parallelen direct gesehenen möglich werden, während unsere Ver-

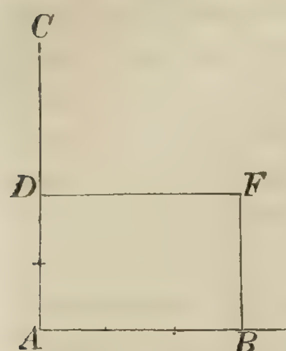
gleichungen solcher Strecken von den peripherischen Theilen des Gesichtsfeldes sehr unsicher und fehlerhaft sind. Nicht übereinstimmende Strecken werden aber auch in der Mitte des Gesichtsfeldes nicht unmittelbar, sondern nur mit Hilfe von Drehungen des Kopfes oder des Objects verglichen werden können, eine Art der Vergleichung, welche nothwendig viel unvollkommener ist, als die durch Drehung des Auges allein.

Die oben angegebenen Thatsachen lehren nun auch weiter, dass man in der That solche Linien und Winkel, welche übereinstimmende Lage haben, und deshalb mit denselben Netzhautpunkten zur Deckung gebracht werden können, leicht und gut auch der Grösse nach miteinander vergleicht, während die Grössenverhältnisse solcher Linien und Winkel, die nicht übereinstimmende Lage haben, sowohl eine beträchtliche Unsicherheit, als auch gewisse regelmässige constante Fehler bei der Vergleichung zeigen. Bis zu einem gewissen Grade lernen wir natürlich auch Linien und Winkel vergleichen, die nicht übereinstimmende Lage haben, wie die Seiten und Winkel eines Quadrats oder eines gleichseitigen Dreiecks, indem wir entweder die Objecte vor uns haben und herumdrehen, so dass wir sie in verschiedener Stellung erblicken, oder indem wir unseren Kopf drehen. Beides geschieht aber nicht so häufig, nicht in so regelmässig wiederkehrender Weise, wie die blosse Bewegung des Auges, daher die Uebung in Bezug auf die Vergleichung von Objecten nicht übereinstimmender Lage natürlich sehr mangelhaft bleibt.

Bei einer unsicheren Wahrnehmung wird nun unser Urtheil auch leicht durch andere Motive, die darauf Einfluss haben, irre geleitet. Wir werden sehen, dass die Täuschung über die Grösse der rechten Winkel in einer ganz besonderen Beziehung zum zweiäugigen Sehen steht und deshalb bei verschiedenen normalsichtigen Individuen auch in ziemlich übereinstimmender Grösse wiederkehrt. Die Täuschung, durch welche uns verticale Linien zu gross erscheinen im Vergleich zu horizontalen, zeigt dagegen sehr grosse Differenzen bei verschiedenen Individuen, und hier finde ich auch bei mir selbst das Urtheil sehr wechselnd und sehr unsicher. Dabei mag vielleicht von Einfluss sein, dass die meisten Figuren der Art, gegen welche wir unsere Stellung so wechseln, oder deren Stellung gegen uns wir so wechseln lassen können, dass ihre verschieden gerichteten Linien und Winkel sich nach einander auf denselben Netzhautparthien abbilden, solche sind, die auf dem Fussboden gezogen sind, oder auf ebenen Tafeln, die wir, wie unsere Bücher, so in der Hand halten, dass ihr unteres Ende dem Auge näher ist, als das obere. Warum wir diese Haltung wählen, wird sich in der Lehre vom Horopter zeigen. Bei solcher Lage der Linien erscheinen aber in der That verticale Linien immer in perspectivischer Verkürzung, und wir können dadurch geneigt werden, sie immer für länger zu halten, als sie ihrer scheinbaren Grösse nach sind.

Uebrigens ist ferner ersichtlich, dass wenn einmal durch irgend welche Motive festgestellt ist, welcher Meridian für senkrecht gehalten werden soll, und welches Längenverhältniss verticaler und horizontaler Linien gleich der Einheit erscheinen soll, dass dann auch die scheinbare Lage jedes anderen Punktes im Sehfelde bestimmt ist.

Wenn wir uns hierbei beschränken auf den mittleren Theil des Sehfeldes, welcher annähernd als Ebene betrachtet werden kann, so können wir uns die geometrische Lage der Punkte durch rechtwinkelige Coordinaten gegeben denken. Es sei in *Fig. 171* AB die dem Netzhauthorizont entsprechende Horizontale, CA eine Verticale, A der Blickpunkt. Dem entspreche die scheinbare Lage im Sehfelde ab für den Netzhauthorizont, ac für den verticalen Meridian. Es sei der Punkt F im geometrischen Sehfelde abstehend um zwei Längeneinheiten von der Axe AB, um drei von der Axe AC. Tragen wir auf ab drei Längeneinheiten ab gleich denen von AB, und auf ac die Linie ad, welche zwei Längeneinheiten von AC gleich lang erscheint, und vervollständigen das Parallelogramm $abdf$, so ist f die scheinbare Lage von F, denn der Construction gemäss müssen alle einzelnen Linienstücke und Winkel der beiden Figuren einander gleich erscheinen.



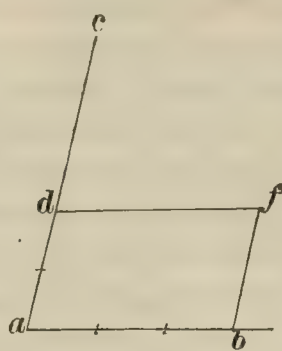


Fig. 171.

Die scheinbare Lage der Punkte im mittleren, scharf gesehenen Theile des Sehfeldes, welchen wir als Ebene betrachten können, wird also nach der vorgetragenen Theorie, wie es auch in der That der Fall ist, aus der geometrischen hergeleitet werden, wenn wir die Punkte aus einem rechtwinkeligen Coordinatensystem in ein schiefwinkeliges mit verändertem Axenverhältniss übertragen. Indessen lässt sich auch, wie aus bekannten Sätzen der analytischen Geometrie erhellt, in solchen Fällen immer eine bestimmte Axenrichtung eines rechtwinkeligen Systems angeben, an dem die Uebertragung dadurch vorgenommen werden kann, dass nur die der einen Axe parallelen Coordinaten in einem bestimmten Verhältnisse verkürzt oder verlängert werden. Die Winkel und Axenverhältnisse, welche diesen Umformungen zu Grunde zu legen sind, sind schon oben angegeben.

Ich muss hier noch bemerken, dass die beschriebenen thatsächlichen Verhältnisse nicht passen zu zwei anderen Theorien, die über die Ausmessung des Sehfeldes aufgestellt worden sind. Eine Anzahl von Physiologen hat sich der Annahme von J. Müller angeschlossen, dass die Netzhaut die Fähigkeit hätte, ihre eigenen räumlichen Dimensionen wahrzunehmen. Dann würden die tangential gerichteten Strecken nahe der Peripherie des Sehfeldes nicht zu gross, wie sie es thun, sondern vielmehr zu klein erscheinen müssen, da, wie der Querschnitt des Auges auf Taf. I, *Fig. 1* lehrt, die Netzhaut gegen ihren vorderen Rand an der *Ora serrata gg* hin beträchtlich enger wird, als eine um den Knotenpunkt beschriebene Halbkugel. Wie es sich unter dieser Annahme mit den radialen Dimensionen verhalten müsste, lässt sich nicht gut entscheiden, da die Brechung der Strahlen, welche sie bei so schiefem Einfall in Richtung zur Axe hin erleiden, und die Lage des Netzhautbildes nicht genau bestimmt werden können.

Eine zweite Annahme, die zur Erklärung der Ausmessung des Sehfeldes gebraucht worden ist, ist von mehreren Physiologen aus E. H. Weber's Versuchen über die Empfindungskreise der Haut und der Netzhaut hergeleitet worden, freilich wohl kaum, wie mir scheint, im Sinne dieses Autors [1]. Danach sollen die kleinsten räumlich unterscheidbaren Ausdehnungen als Einheiten des Flächenmaasses benutzt werden. Räumliche Trennung zweier Eindrücke kann, wie schon auf Seite 215 erörtert wurde, nur wahrgenommen werden, wenn zwischen zwei erregten Flächenelementen ein nicht erregtes oder anders erregtes übrigbleibt und wahrgenommen werden kann. Die Grösse der kleinsten unterscheidbaren Flächenelemente ist nun an verschiedenen Theilen der Netzhaut sowohl, wie ausser Weber auch Aubert und Förster erwiesen haben, als auch an verschiedenen Stellen der Haut sehr verschieden, so dass die Entfernung der erregten Punkte an verschiedenen Theilen sehr verschieden gross gewählt werden muss, wenn man sie als zwei unterscheiden soll. Setzt man also zwei Zirkelspitzen auf eine Stelle der Haut, wo ihre Distanz kleiner als die kleinsten unterscheidbaren Entfernungen ist, so verschmelzen ihre Eindrücke in einen, man glaubt nur mit einer Spitze berührt zu sein. Setzt man sie auf eine Stelle auf, wo ihre gesonderte Unterscheidung nur undeutlich erfolgt, so ist man allerdings geneigt, sie für näher zu halten, als sie wirklich sind; setzt man sie endlich an feiner unterscheidenden Theilen auf, wo ihre Trennung leicht erkannt wird, so erkennt man, wie ich wenigstens finde, richtig ihre wahre Distanz. So erscheinen mir also zum Beispiel Zirkelspitzen von vier Linien Distanz an der Zungenspitze, an der Fingerspitze, an den Lippen in gleicher Entfernung von einander, obgleich an den Lippen ein Abstand von $\frac{1}{2}$ Linie unterschieden wird, an der Fingerspitze dagegen nur einer von 1, an den Lippen von 2 Linien. Dagegen am Kinn und unterhalb des Kinnes, wo die Unterscheidung der Spitzen bei der genannten Distanz schwierig und unsicher wird, erscheinen sie mir, wenn ich sie unterscheide, wohl etwas näher zusammengerückt zu sein, als sie wirklich sind, nach dem allgemeinen Gesetze des Empfindens, wonach deutlich wahrnehmbare Unterschiede grösser erscheinen als undeutlich wahrnehmbare. Aber doch scheinen sie mir am Halse, so lange ich sie überhaupt noch unterscheiden kann, niemals so nahe zu sein, als wenn ich die Spitzen eine halbe Linie oder eine Linie von einander entfernt, an die Zungenspitze ansetze. Die kleinsten unterscheidbaren Grössen erscheinen also keineswegs an allen Stellen der Haut gleich gross, sondern sie erscheinen sehr verschieden gross.

Ebenso verhält es sich auf der Netzhaut. Wenn ich zwei kleine schwarze Kreise von 2 Millimeter Durchmesser und ebensoviel gegenseitigem Abstand im indirecten Sehen betrachte, und eine Stelle suche, wo sie zuerst mir anfangen sichtbar zu werden, so erscheinen sie mir dort keineswegs näher aneinanderzustehn, als sie wirklich sind, und jedenfalls nicht im entferntesten so nahe, als zwei mit dem Centrum der Netzhaut fixirte Punkte, die an der Grenze der Unterscheidbarkeit sind.

[1] E. H. Weber über den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge. Berichte der Sächs. Ges. 1852, S. 85—164.

Ich glaube deshalb, dass es eine unzulässige Erweiterung der Weber'schen Theorie von den Empfindungskreisen ist, wenn man diesen Kreisen überall dieselbe scheinbare Grösse zuschreiben und sie als elementare Maasseinheiten der Raumabmessungen benutzen will. Für das Auge würde aus einer solchen Annahme in der That auch folgen, dass die ganze Peripherie des Sehfeldes in allen Dimensionen relativ viel kleiner erscheinen müsste, als Objecte gleicher Winkelgrösse in der Mitte des Sehfeldes. Wir haben im Gegentheil gesehen, dass die tangentialen Richtungen vergrössert erscheinen; die radialen allerdings, wenigstens am oberen und unteren Rande des Sehfeldes verkleinert.

Damit steht es keineswegs in Widerspruch, dass bei der Ausmessung sehr kleiner Abstände, für deren Beurtheilung das mittels der Augenbewegungen ausgebildete Augenmaass nicht genau genug ist, die Empfindungskreise, wie schon oben bemerkt wurde, benutzt werden.[6] Wir kommen auf diese Fragen übrigens bei den Phänomenen des blinden Flecks weiter unten noch einmal zurück.

Ausser den hier beschriebenen allgemeinen Täuschungen über die Grössenverhältnisse des Sehfeldes, welche vom Gesetz der Augenbewegungen und von der Art, wie wir unser Sehfeld kennen lernen, abhängig sind, giebt es noch eine Reihe von Täuschungen, welche von besonderen Eigenthümlichkeiten der betrachteten Figuren abhängen, aber auch interessant sind, weil sie mehr oder weniger deutlich die Motive kennen lehren, denen wir bei der Schätzung der Grösse und Formen im Sehfelde folgen.

Man kann die hier in Betracht kommenden Phänomene meist auf die schon bei den Contrasterscheinungen aufgestellte Regel zurückführen, dass deutlich zu erkennende Unterschiede bei allen Sinneswahrnehmungen grösser erscheinen, als undeutlich zu erkennende Unterschiede von gleicher objectiver Grösse. Eine erste Folge davon ist, dass wir eine getheilte Raumgrösse leicht für grösser halten, als eine ungetheilte, weil die directe Wahrnehmung der Theile uns deutlicher erkennen lässt, dass die betreffende Grösse so viel und so grosse Theile enthalte, als wenn die Theile nicht erkennbar abgezeichnet sind. So wird man in der nebenstehenden Linie *Fig. 172* leicht das Stück ab gleich bc halten, obgleich in der That ab grösser ist als bc. Eine Reihe von Messungen über diese Art der Täuschung ist von A. Kundt [1] ausgeführt worden. Er blickte nach 5 stählernen Spitzen A, B, C, D, E, die hinter einem Schirme so hervorragten, dass die Entfernung $AB = 20{,}2$ Millimt., $BC = 40{,}2$ Mm., $AE = 241{,}9$ Mm. war. Die Spitze D wurde nach dem Augenmaasse in die Mitte eingestellt. Wäre sie wirklich in der Mitte gewesen, so hätte die Entfernung CD betragen müssen 60,55 Mm. Sie wurde aber im Mittel aus 120 Versuchen eines Beobachters gemacht gleich 57,87 Mm., so dass die scheinbare Mitte um 2,68 Mm. nach Seite der Spitzen A, B und C von der Mitte hin entfernt lag. Bei einem anderen Beobachter ergab sich im Mittel aus 120 Versuchen die Abweichung

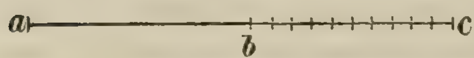


Fig. 172.

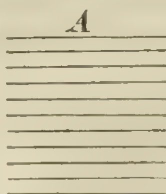
[1] Poggendorff's Annalen CXX. S. 118.

gleich 3,95 Mm. Die Entfernung der Spitze *D* vom Knotenpunkte des Auges betrug in allen Fällen 338 Mm.

Zu bemerken ist, wie bei diesen Versuchen sich herausstellte, dass das rechte Auge die rechte Hälfte einer zu halbirenden Distanz grösser zu machen strebt, das linke Auge die linke Hälfte. Der erste Beobachter machte die dem gebrauchten Auge entsprechende Hälfte um 2,24 Mm., der zweite um 4,77 Mm. grösser als die andere.

Bei den beschriebenen Versuchen werden Distanzen verglichen, welche mit denselben Netzhautpunkten zur Deckung gebracht werden können. Viel auffallender werden die Täuschungen, wenn die zu vergleichenden Distanzen verschiedene Richtung haben.

Man betrachte *Fig. 173 A* und *B*; die beiden liniirten Flächen sind richtig gezeichnete Quadrate. Beide sollten höher als breit erscheinen der oben besprochenen Täuschung gemäss. Das ist bei *A* auch in übertriebenem Maasse der Fall; *B* sieht umgekehrt zu breit aus.



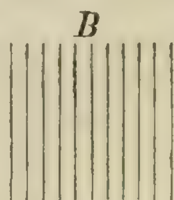


Fig. 173.

Dasselbe gilt für Winkel; man betrachte *Fig. 174*. Die Winkel *1*, *2*, *3*, *4* sind rechte Winkel, und sollten, mit beiden Augen gleichzeitig betrachtet, so erscheinen. Aber *1* und *2* erscheinen spitz, *3* und *4* stumpf; noch stärker wird die Täuschung, wenn man die Figur nur mit dem rechten Auge betrachtet; mit dem linken gesehen, sollten dagegen *1* und *2* stumpf erscheinen, wegen der oben erwähnten Abweichung des verticalen Meridians; sie erscheinen aber nur etwa als rechte, in ihrer wahren Form. Dreht man die Figur, dass *2* und *3* nach unten sehen, so erscheint im Gegentheil *1* und *2* dem linken Auge übertrieben spitz, dem rechten richtig. Es erscheinen die getheilten Winkel also verhältnissmässig immer grösser, als sie ohne die Theilung erscheinen würden.

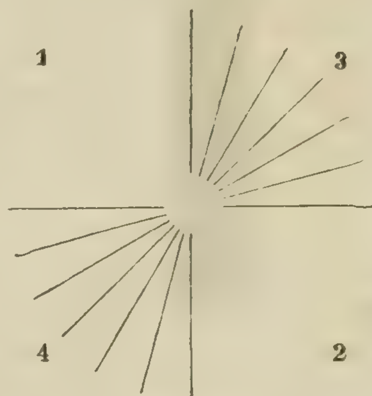
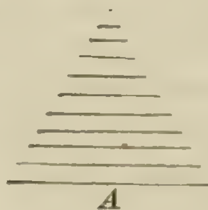


Fig. 174.

Die *Fig. 175* zeigt zwei gleichseitige Dreiecke; *A*, was horizontal getheilt ist, erscheint viel zu hoch, wie es auch ohne die Liniirung der Fall sein würde. In *B* dagegen erscheint der Winkel rechts an der Grundlinie grösser als der links und die Spitze des Dreiecks nach rechts herübergerückt. Derselbe Einfluss zeigt sich bei vielen aus dem gewöhnlichen Leben bekannten Beispielen. Ein leeres Zimmer sieht kleiner aus als ein möblirtes, eine mit einem Tapetenmuster bedeckte Wand grösser als eine einfarbig angestrichene. Damenkleider mit Querstrichen lassen die Figur höher erscheinen. Ein bekannter gesellschaftlicher Scherz ist es, dass man Jemandem



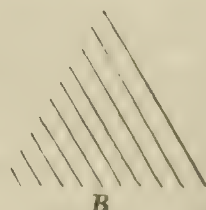


Fig. 175.

einen cylindrischen Herrnhut zeigt und ihn auffordert, an der Wand vom Fussboden ab anzuzeigen, wie hoch der Hut sei. Er macht ihn in der Regel anderthalb Mal zu hoch.

Hierher möchte auch eine von Bravais [1] beobachtete Thatsache gehören. Er berichtet: Wenn ein Beobachter, der sich auf dem Meere in einer gewissen Entfernung von einer Küste befindet, welche grosse Unregelmässigkeiten des Terrains darbietet, dieselbe so zeichnet, wie sie dem Auge erscheint, so findet er durch vergleichende mathematische Ermittlung, dass in der so erhaltenen Zeichnung die horizontalen Lineargrössen nach den gehörigen Verhältnissen unter einander, die verticalen Winkeldistanzen aber nach einem doppelten Maasstabe geschätzt sind. Diese Täuschung, der man unwillkührlich bei dieser Art Schätzungen unterliegt, ist nicht individuell, wie man glauben könnte, vielmehr beweisen zahlreiche Beobachtungen ihre Allgemeinheit. An diese Fälle schliessen sich verschiedene in neuerer Zeit bekannt gemachte optische Täuschungen an.

Man betrachte *Fig. 176 A.* Nicht *d* erscheint als Fortsetzung der Linie *a*, was es in der That ist, sondern vielmehr *f*, welches etwas niedriger liegt. Noch auffallender ist diese Täuschung, wenn die Figur in kleinerem Maasstabe ausgeführt ist, wie in *B*, wo die beiden Stücke der dünnen Linien wirklich Verlängerungen von einander sind, aber nicht so scheinen, und in *C*, wo sie so scheinen, aber es nicht sind. Zeichnet man solche Figuren wie *A*, ohne das Stück *d*, und betrachtet sie aus immer grösserer Entfernung (indem nöthigenfalls die Accommodation des Auges durch Brillengläser verbessert wird), so dass sie in immer kleinerer scheinbarer Grösse erscheinen, so findet man, dass man *ef* immer weiter herunterrücken muss, damit es als Verlängerung von *a* erscheine, je ferner und scheinbar kleiner die Figur ist.

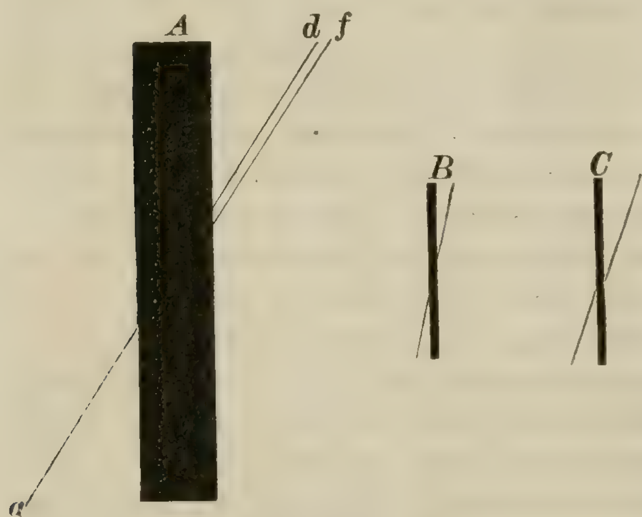


Fig. 176.

Macht man die dünnen Linien lang wie in *Fig. 177* (S. 565) *A*, so wird man bemerken, dass sie in der Nähe der breiteren schwarzen Linie so eingebogen erscheinen, wie ich etwas übertrieben in *B* gezeichnet habe, dass die entfernteren Enden der dünnen Linie allerdings ganz richtig als Verlängerungen von einander erscheinen, und dass nur durch jene Einbiegungen in der Nähe der sie schneidenden starken Linie der Schein entsteht, als träfen sie nicht auf einander.

Es sind dies nun gerade die Erscheinungen, welche in diesem Falle die Irradiation hervorbringen muss, und es ist schwer zu scheiden, was ihr an-

[1] Fechner Centralblatt, 374—379; 558—561.

gehört und was etwa noch daran durch solche Umstände, wie sie theils schon erwähnt sind, theils bei den folgenden Täuschungen noch erwähnt werden sollen, bewirkt wird. Dass Irradiation auch von schwarzen Linien auf weissem Grunde vorkommt, ist schon oben S. 324—326 erörtert worden. Nahe dem Scheitel der beiden spitzen Winkel treffen die Zerstreuungskreise der beiden schwarzen Linien zusammen und verstärken sich gegenseitig; dadurch rückt das Maximum des Dunkels in dem Netzhautbilde der schmalen Linie dem breiten Streifen näher und sie erscheint gegen diesen hingelenkt. Bei den in grösserem Maassstabe gezeichneten Figuren derselben Art, wie *Fig. 176 A*, kann indessen kaum Irradiation der einzige Grund sein.

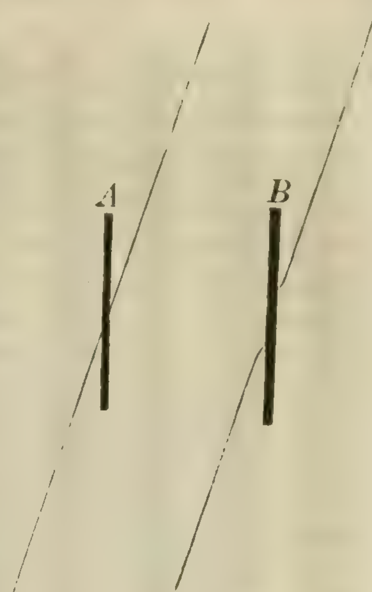


Fig. 177.

Die *Fig. 178 A* und *B* zeigt Beispiele, welche von Hering angegeben wurden, die geraden und parallelen Linien *ab* und *cd* erscheinen in *A* nach aussen, in *B* nach innen gebrochen.

Am auffallendsten aber ist das in *Fig. 179* gegebene, von Zoellner veröffentlichte Beispiel. Die verticalen schwarzen Streifen der letzteren Figur sind

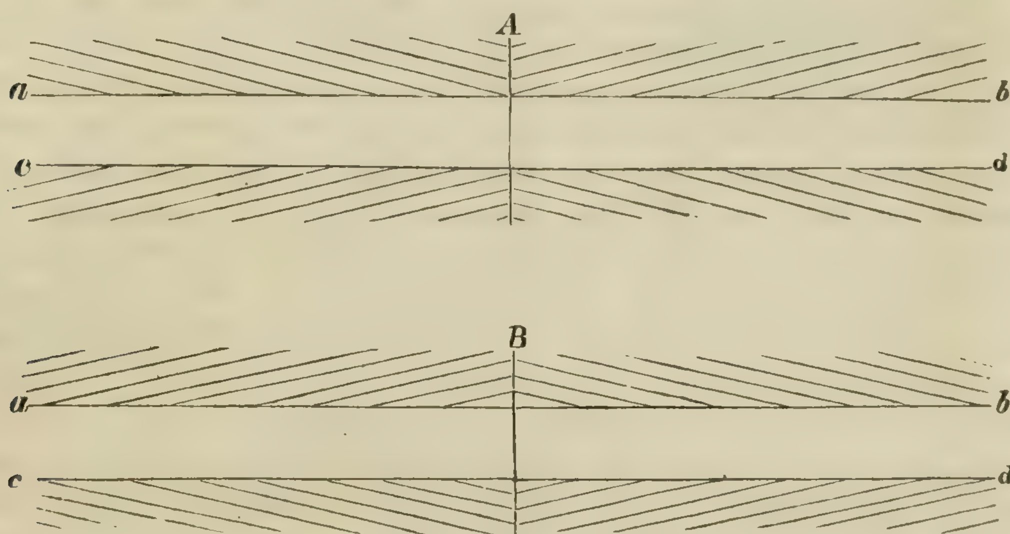


Fig. 178.

einander parallel, erscheinen aber convergent und divergent, so dass sie immer in entgegengesetzter Richtung von der Verticalen abzuweichen scheinen, als die kurzen schrägen Striche, von denen sie geschnitten werden. Dabei sind die Hälften der schrägen Striche so gegen einander verschoben, wie die Hälften der schmalen Linien in *Fig. 176*. Dreht man die Zeichnung so, dass die breiten Verticalstriche unter 45° gegen den Horizont geneigt erscheinen, so wird die scheinbare Convergenz auffallender, dagegen die scheinbare Verschiebung der Hälften der dann horizontal und vertical liegenden Querstriche weniger auffallend. Die verticalen und horizontalen Linien werden also im Ganzen weniger in ihrer Richtung verändert, als die schräg durch das Gesichtsfeld laufenden.

Diese zuletzt beschriebenen Täuschungen kann man betrachten als neue Beispiele für die oben gegebene Regel, dass spitze Winkel, als deutlich abgegrenzte kleine Grössen, in der Regel verhältnissmässig zu gross erscheinen, wenn wir sie mit stumpfen oder rechten ungetheilten Winkeln vergleichen. Wenn nun die scheinbare Vergrösserung eines spitzen Winkels so geschieht, dass seine beiden Schenkel scheinbar nach aussen rücken, so müssen die Täuschungen *Fig. 176*, *178* und *179* eintreten. In *Fig. 176* würden sich die dünnen Linien dabei scheinbar um den Punkt drehen, wo sie in den dicken Streifen eintreten und dann nicht mehr in gegenseitiger Verlängerung liegen. In *Fig. 178* werden die beiden Hälften jeder der beiden geraden Linien immer scheinbar so verstellt, dass sich die spitzen Winkel, die sie mit den schrägen Linien machen, vergrössern. Dasselbe geschieht scheinbar mit den Verticalstreifen der *Fig. 179*.



Fig. 179.

Indessen ist in den Fällen von *Fig. 178* und *179* die angegebene Ursache unter gewöhnlichen Verhältnissen nur an einem kleinen Theile der Wirkung Schuld; und der grössere Theil der Wirkung hängt, wie ich gefunden habe, von Bewegungen der Augen ab. Die genannten Täuschungen schwinden nämlich ganz, oder bleiben nur in schwachen Resten bestehen, wenn ich einen Punkt der Zeichnungen so fixire, wie es nöthig sein würde, um ein Nachbild zu entwickeln, und wenn es gelingt, ein scharf gezeichnetes Nachbild zu erhalten, was namentlich für das ZOELLNER'sche Muster *Fig. 179* möglich ist, so ist in dem Nachbilde keine Spur der Täuschung mehr zu erkennen.

In *Fig. 176* hat Bewegung des Blicks keinen deutlichen Einfluss auf Verstärkung der Täuschung, im Gegentheile verschwindet diese, wenn ich der dünnen Linie *ad* mit dem Blicke folge. Dagegen verschwindet die Täuschung umgekehrt durch Fixation verhältnissmässig leicht bei *Fig. 178*, schwerer bei *Fig. 179*. Doch kann ich sie auch bei dieser letztern Figur beseitigen, wenn ich fest fixire und nicht die schwarzen Streifen als Objecte, die auf weissem Grunde liegen, betrachte, sondern die weissen Streifen gleichsam als Zweige mit Fiederblättchen, die auf schwarzem Grunde liegen, aufzufassen suche. Sobald mir dies gelingt, sehe ich alles richtig. So wie ich dann aber anfange, den Blick über die Zeichnungen hin zu bewegen, ist die Täuschung in voller Stärke wieder da.

Auch gelingt es bei diesen Figuren die Täuschung ganz oder fast ganz zu vermeiden, wenn man sie zuerst mit einem undurchsichtigen Papiere bedeckt, über dieses eine Nadelspitze als Fixationspunkt unbeweglich

hinhält, und während man diese ganz scharf und sicher fixirt, das bedeckende Papier zwischen ihr und der Zeichnung fortzieht. Ob man gut fixirt hat, kann man nach der Schärfe des dabei ausgebildeten Nachbildes beurtheilen.

Die sicherste und leichteste Methode, den Einfluss der Augenbewegungen zu beseitigen, ist die Beleuchtung mittels des elektrischen Funkens, weil während der ausserordentlich kurzen Dauer eines solchen Funkens das Auge keine merkliche Bewegung ausführen kann. Dazu benutze ich einen hölzernen innen schwarz angestrichenen Kasten *ABCD*, *Fig. 180*. Bei *f* in der vorderen und bei *g* in der hinteren Wand waren in der Entfernung der Augen von einander je zwei Löcher [1] eingebohrt worden. Durch die Löcher *f* blickte der Beobachter hinein, vor die Löcher *g* wurden innen die Zeichnungen befestigt, welche selbst mit einem Nadelstich durchbohrt waren, der auch ohne die elektrische Entladung in dem übrigens ganz dunklen Kasten gesehen und fixirt werden konnte. An seiner untern Seite, die auf der Tischplatte *BD* ruht, ist der Kasten offen; wenn man die Zeichnung wechseln will, kehrt man ihn um und greift hinein. Das Zimmer wurde mässig dunkel gemacht, so dass der Beobachter die elektrischen Apparate noch sehen und handhaben konnte, dass aber doch im Innern des Kastens nichts ausser jenen Nadelstichen sichtbar war. Die Drähte, welche zur Zuleitung der Elektricität dienen, sind *hi*, bei *k* ist die Unterbrechungsstelle; *l* ist ein Kartenstreifen, der auf der dem Funken zugekehrten Seite weiss ist und das Licht desselben vom Auge des Beobachters abhält, dagegen nach der Zeichnung hinwirft. Die Funken wurden durch die secundäre Spirale eines grossen Inductionsapparates von Ruhmkorff, die mit den Belegen einer Leydener Flasche verbunden war, gegeben. Den Schluss der primären Spirale und deren Unterbrechung brachte der Beobachter mit der Hand hervor [2].

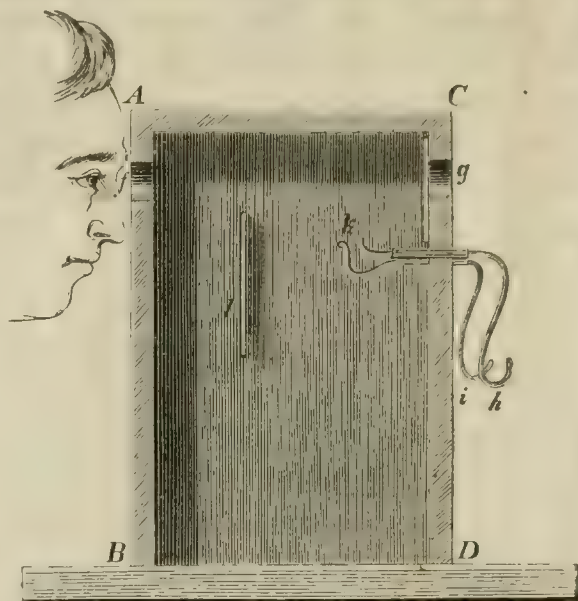


Fig. 180.

Es fand sich, dass bei elektrischer Beleuchtung die Täuschung bei der *Fig. 176* unverändert blieb, dagegen bei den Zeichnungen der *Fig. 178* ganz schwand, bei *179* nicht immer ganz fehlte, aber, falls sie eintrat, viel schwächer und zweifelhafter war, als sonst, während doch andererseits die Beleuchtung durch den elektrischen Funken vollkommen genügend war, um die Formen der gerade gesehenen Gegenstände deutlich zu erkennen.

Es sind also zwei verschiedene Erscheinungen zu erklären, nämlich erstens der geringere Grad der Täuschung, der bei Vermeidung der Augenbewegungen

---

[1] Je zwei Löcher, weil der Apparat namentlich auch für stereoskopische Versuche gebraucht werden sollte.

[2] Beim Mangel hinreichend starker elektrischer Apparate kann das von Volkmann construirte Tachistoskop dienen (Leipziger Sitzungsber. 1850, p. 90—98), auf welchem ein fallender Schieber für einen Moment die eine oder zwei Oeffnungen öffnet, durch die der Beobachter blickt.

eintreten kann, und zweitens die Verstärkung der Täuschung durch Bewegung des Auges. In ersterer Beziehung genügt, wie ich glaube, das Gesetz des Contrastes, wonach ein deutlich wahrnehmbarer Unterschied grösser erscheint, als ein weniger deutlich wahrnehmbarer. Am deutlichsten wahrnehmbar ist im indirecten Sehen die Uebereinstimmung der Richtung gleichartiger Raumgrössen. Die Abweichung des Schenkels eines spitzen oder stumpfen Winkels von der Richtung des anderen Schenkels im Schnittpunkt wird deutlicher wahrgenommen, als die Abweichung desselben Schenkels von dem nicht gezeichneten Loth, welches auf dem anderen Schenkel senkrecht steht. Somit erscheint der Unterschied eines Winkels von 0^0 oder 180^0 relativ zu gross gegen den von 90^0; ein spitzer Winkel also zu gross, ein stumpfer zu klein. Indem diese scheinbare Vergrösserung der Winkel auf beide Schenkel vertheilt wird, entstehen die scheinbaren Verschiebungen und Richtungsänderungen der Schenkel. Scheinbare Verschiebungen der Linien, wobei sie ihrer wirklichen Richtung parallel bleiben, werden schwer corrigirt, daher die Täuschung der *Fig. 176* verhältnissmässig am hartnäckigsten ist. Richtungsänderungen dagegen können durch eine genauere Betrachtung der Figur leichter erkannt werden, wenn dadurch scheinbare Nichtübereinstimmung zwischen übereinstimmenden Linien hervorgebracht worden ist, und nur dadurch, dass in *Fig. 178* und *179* die übereinstimmenden Linien, welche verändert erscheinen, durch die grosse Zahl kreuzender schräger Linien einander im Anblick unähnlich gemacht werden, ist es wohl überhaupt möglich, dass ihre Uebereinstimmung übersehen werden kann.

Jetzt haben wir noch den Einfluss der Bewegung auf die scheinbare Richtung gesehener Linien zu untersuchen. Einfache Versuche zeigen, dass selbst bei einfachen geraden Linien ein solcher Einfluss besteht, wenn die Richtung der Bewegung unter einem spitzen Winkel gegen die Richtung der Linie geneigt ist. Da wir eine überwiegende Neigung haben, bei den Bewegungen unseres Auges der Richtung der hervorstechenderen Linien des Gesichtsfeldes zu folgen, so ist es bei diesen Versuchen nöthig, den Blickpunkt im Blickfelde so, wie man es beabsichtigt, zu führen mittels einer Spitze, die man fortdauernd fixirt und über die betreffende Zeichnung hingleiten lässt.

Man ziehe auf einem Papier eine lange gerade Linie *A* und bewege die Spitze, welche man fixirt, in Richtung einer zweiten geraden Linie *B*, welche die erste unter einem sehr kleinen Winkel schneidet. Die zweite gerade Linie braucht nicht gezeichnet zu sein; doch schadet es auch nicht, wenn sie wirklich sichtbar gezogen wird. Wenn man der bewegten Spitze mit dem Blicke folgt, so scheint dabei die gerade Linie *A* auf dem Papier eine Bewegung gegen die Nadelspitze hin oder von ihr weg zu machen, je nachdem sich die Nadel ihr nähert oder von ihr entfernt. Das Bild der Linie *A* verschiebt sich dabei auf der Netzhaut theils parallel sich selbst, theils in Richtung der Breite. Die erstere Bewegung wird wenig oder gar nicht bemerkt, wenn die Linie lang ist und keine deutlich gezeichneten Merkpunkte besitzt; die zweite Bewegung senkrecht zu ihrer Länge wird dagegen desto deutlicher bemerkt.

Dabei scheint auch die Richtung der Linie *A* verändert, und zwar so,

dass der Winkel, den sie mit der Linie *B* macht, in der sich die Spitze bewegt, vergrössert erscheint. Das letztere erkennt man am besten, wenn man eine gerade Linie *ab*, *Fig. 181*, zieht, und eine Spitze eines Zirkels so auf das Papier

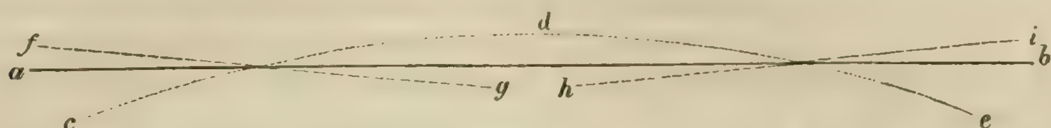


Fig. 181.

aufsetzt, dass die andere sich in dem Bogen *cde* hin und herbewegen kann. Wenn man dann dieser beweglichen Spitze mit dem Auge folgt, so scheint die Linie *ab* sich abwärts zu bewegen, so lange man die Zirkelspitze von *c* nach *d* gehen lässt, aufwärts, wenn sie von *d* nach *e* geht. Gleichzeitig erhält die ganze Linie *ab* scheinbar eine Richtung wie *fg*, so lange sich der Blick des Beobachters der Spitze folgend längs *cd* bewegt, und eine Richtung wie *hi*, wenn er sich zwischen *d* und *e* bewegt. Während man bei der Bewegung von *c* nach *e* durch den höchsten Theil des Bogens bei *d* hindurchgeht, verändert die Linie *ab* deutlich ihre Richtung.

Wenn man nun über das ZOELLNER'sche Muster horizontal von rechts nach links eine Nadelspitze führt und ihr mit dem Blicke folgt, so kommt die Figur in die seltsamste Unruhe; der erste, dritte, fünfte schwarze Streifen steigen aufwärts, der zweite, vierte, sechste abwärts; oder umgekehrt, wenn die Richtung der Bewegung umgekehrt wird. Dabei erscheinen die aufwärtssteigenden den abwärtssteigenden nicht parallel, sondern theils gegen einander, theils auch gegen die Ebene der Zeichnung in entgegengesetzter Weise geneigt, und zwar neigen sich die aufwärtssteigenden mit ihrem oberen Ende der Richtung, in der die Nadelspitze bewegt wird, entgegen, die abwärtssteigenden mit demselben Ende dagegen im Sinne der genannten Richtung, so dass also in besonders auffallender Weise während dieser Scheinbewegung die eigenthümliche Täuschung durch die beschriebene Figur zum Vorschein kommt.

Um die Scheinbewegung recht deutlich zu sehen, muss man eine mittlere Geschwindigkeit mit der Nadelspitze einhalten, die weder zu gross noch zu klein sein darf, und muss den Blick ganz fest an die Nadelspitze heften. Wenn es nicht gleich gelingt, kann man auch die Nadelspitze fest stellen und fest betrachten und hinter ihr die Zeichnung vorbeiziehen. Die Ursache der Scheinbewegung ist offenbar dieselbe, wie bei dem oben beschriebenen Versuche mit der einzelnen geraden Linie. Wir nähern uns in geneigter Richtung den schrägen Querstrichen und diese scheinen sich deshalb zu bewegen; sie nehmen dabei die verticalen schwarzen Streifen, mit denen sie verschmolzen sind, gleichsam mit. Wenn nun der schwarze verticale Streifen, dem wir uns nähern, dabei eine verticale Bewegung zeigt nach aufwärts, so ist dies eine ähnliche Erscheinung, als wir haben würden, wenn wir uns ihm nicht in senkrechter Richtung näherten, sondern unter einem spitzen Winkel, dessen Spitze nach abwärts sieht, und umgekehrt bei den abwärtssteigenden Streifen ist die Scheinbewegung dieselbe, als wenn wir uns ihnen näherten unter einem spitzen Winkel, dessen Spitze nach aufwärts sieht. Da nun aber die Richtung der

wirklichen Bewegung unseres Blicks für alle Streifen dieselbe ist, so erscheinen uns umgekehrt die Streifen gegen die Bewegungslinie des Blicks geneigt, die aufsteigenden mit dem oberen Ende der Richtung dieser Bewegung entgegen, die absteigenden ihr folgend, wie in *Fig. 182* angezeichnet ist, wo *ab* die Richtung bezeichnen soll, in der sich der Blick bewegt, *cc*, *dd*, *ee*, *ff* die scheinbare Lage der verticalen Streifen in übertriebener Divergenz, und die Pfeile neben diesen letzteren Linien die Richtung, in der sich so gestellte Linien scheinbar bewegen würden, wenn der Blick in Richtung der horizontalen Pfeile fortgleitet.

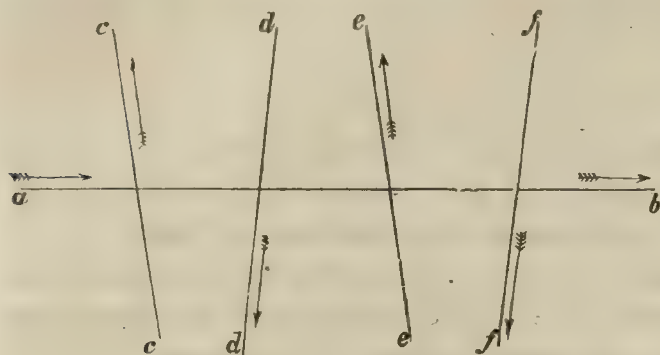


Fig. 182.

Macht man die Bewegung der Spitze, der das Auge folgt, allmälig langsamer, so wird auch die Scheinbewegung langsamer, wird leichter übersehen, kann aber bei einiger Aufmerksamkeit erkannt werden, und gleichzeitig finde ich, dass die scheinbare Divergenz der verticalen Streifen sich weniger bestimmt zeigt. Ohne Hilfe einer leitenden Spitze kommt weder die Scheinbewegung der Streifen noch ihre scheinbare Divergenz so schön zum Vorschein, wie mit einer solchen, wahrscheinlich weil wir unseren Blick über eine Zeichnung mit so hervortretenden Liniensystemen nicht so gleichmässig und so geradlinig hingleiten lassen können. Da übrigens die Täuschung über die Richtung der Streifen mit der über ihre Bewegung gleichzeitig wächst und fällt, so zweifele ich nicht, dass auch die Verstärkung der Täuschung bei den gewöhnlichen Bewegungen des Blicks dieselbe Ursache habe.

Führt man die fixirte Nadelspitze parallel den verticalen Streifen über die Zeichnung, so wird die Täuschung nicht nur nicht verstärkt, sondern sogar geschwächt oder ganz beseitigt. Die verticalen Streifen zeigen sich dann als parallele Richtlinien im Blickfelde dadurch, dass ihre Netzhautbilder sich in sich selbst verschieben.

Der hier beschriebene Einfluss der Scheinbewegung der verticalen Streifen auf die scheinbare Grösse des Winkels zwischen ihnen und der Bewegungsrichtung des Blicks lässt sich übrigens ganz ebenso an einem wirklich bewegten Körper zeigen. Man lege einen mit Theilstrichen versehenen Maasstab in horizontaler Richtung auf ein Blatt Papier, setze dicht neben ihm die eine Spitze eines weit geöffneten Zirkels ein und bewege die andre nahe über der Kante des Maasstabes hin und her; sie wird sich dabei genau normal zur Richtung des Maasstabes bewegen. Jetzt bewege man auch den Maasstab in seiner eigenen Richtung hin und her, so wird die Bewegungslinie der Zirkelspitze durchaus nicht mehr senkrecht zur Richtung des Maasstabes, sondern sehr stark geneigt gegen diese erscheinen, wie sie sich denn in der That in einem am Maasstabe festen Coordinatensystem wirklich als geneigt darstellen würde, während sie, auf ein absolut festes Coordinatsystem bezogen, senkrecht

zur Kante des Maasstabes bleibt. Die Veränderung des Winkels ist übrigens in diesem Falle viel bedeutender als an der Zoellner'schen Figur, weil bei dieser die scheinbare Lagenveränderung nie so weit gehen kann, dass die verschobenen Streifen gegen einander stossen oder gar sich kreuzen, was dem Bilde des indirecten Sehens zu sehr widersprechen würde.

Die Hering'schen Beispiele, *Fig. 178*, bieten dieselben Verhältnisse nur in weniger auffallendem Grade. Die Täuschung wird bei ihnen verstärkt durch Bewegungen des Blicks zwischen oben und unten, geschwächt durch solche von rechts nach links.

Es kann vielleicht auffallen, dass ich zweierlei anscheinend so verschiedene Ursachen zur Erzeugung derselben Täuschungen zusammenwirken lasse. Wenn man sich aber erinnert, dass nach der hier vorgetragenen Ansicht die Kenntniss der Ausmessungen des Sehfeldes im indirecten Sehen auf Erinnerung an frühere bei Bewegungen gemachte Erfahrungen beruht, während bei bewegtem Blick neue ähnliche Eindrücke hinzukommen, so ergiebt sich, dass die beiden Ursachen nicht so verschieden sind, wie sie in der Auseinandersetzung zu sein scheinen; sie sind nur unterschieden wie Erinnerung und gegenwärtige Anschauung analoger Verhältnisse.

Es kommt durch diese Verhältnisse eine Art Contrast für die Richtungen von Linien und für die Entfernungen zu Stande von ähnlicher Wirkung, wie wir ihn im 24. Paragraphen für die Lichtstärken und Farben kennen gelernt haben. Die Unterschiede nahe gleicher Richtungen erscheinen vergrössert; dadurch dass wir eine Linie von einer oder vielen andern geneigten Linien schneiden lassen, wird sie scheinbar nach der entgegengesetzten Seite geneigt, als jene. Die Erscheinungen des Contrastes der Lichtstärken und Farben liessen sich mit Hilfe der Hypothese von Th. Young auf die Vergleichung verschieden starker, aber qualitativ gleicher Erregungen der Fasern zurückführen. Wollte man sich die Localzeichen der Netzhautfasern als Empfindungen von zwei, irgend welchen zwei Coordinatenrichtungen entsprechenden Qualitäten denken, deren Intensität sich continuirlich in der Fläche änderte, so würden die Contraste der Richtungen gerade auf dieselben Eigenthümlichkeiten der Unterscheidung der Empfindungsstärke zurückzuführen sein, wie die der Farben. Da es aber gelang, den Einfluss der Augenbewegungen auf direct sichtbare Erscheinungen zurückzuführen, so können wir eine solche Hypothese vorläufig auf sich beruhen lassen. Uebrigens hat auch Zoellner bei seiner Beschreibung der Täuschung an dem Muster der *Fig. 179* dieselbe auf die Bewegungen des Auges zurückzuführen gesucht. Ganz unzulässig erscheint mir dagegen die von E. Hering gegebene Erklärung. Derselbe meint, dass wir die Entfernung zweier Punkte nach der geradlinigen Entfernung ihrer beiden Netzhautbilder beurtheilen. Demgemäss werden nach ihm im Allgemeinen kleine Entfernungen relativ grösser gesehen als grosse ungetheilte, weil bei kleinen Bögen der Unterschied zwischen dem Bogen und der Sehne, welche die Distanz seiner Enden misst, relativ kleiner ist, als bei grossen. Eben deshalb sollen kleine Winkel stets relativ zu gross im Vergleich zu ihren grösseren Nebenwinkeln gesehen werden. Auf dasselbe Princip hat auch A. Kundt eine ausführlichere

Theorie dieser Erscheinungen zu gründen gesucht und Messungen in der schon oben erwähnten Weise ausgeführt, die sie stützen sollen [1], indem er ungetheilte Linien nach dem Augenmaass getheilten Linien gleich zu machen suchte. Für eine gewisse Länge der Linien stimmen auch Beobachtung und Berechnung ziemlich gut überein, aber bei kleineren Linien ist die Differenz fast doppelt so gross, als sie nach dem aufgestellten Erklärungsprincip sein sollte. Herr Kundt findet nämlich

Gesichtswinkel für die zu vergleichenden Distanzen		Fehler beobachtet	Fehler berechnet
II	20° 14′	4,40	4,62
I	19° 41′	3,31	4,47
III	12° 47′	1,48	0,84

Ich muss hinzufügen, dass die Täuschungen auch bei viel kleineren Figuren bestehen bleiben, bis die Objecte sich der Grenze des deutlichen Sehens nähern, und dass bei so kleinen Objecten ein Unterschied zwischen dem Bogen und der Sehne nicht mehr merklich sein kann. Kundt selbst hat gefunden, dass zum Beispiel seine *Fig. 4* bis auf 9 Fuss Entfernung die Täuschung zeigte, wobei zwischen den betreffenden Bögen und Winkeln selbst in der 5ten Decimale noch kein Unterschied vorhanden ist.

Ich halte deshalb das von Hering und Kundt gebrauchte Erklärungsprincip nicht einmal für einen richtigen Ausdruck der Thatsachen. Wollte man es gar als Erklärung der wirklichen Ursache der Erscheinungen auffassen, so müsste man die Annahmen der nativistischen Theorie dahin ausdehnen, dass uns eine Kenntniss unserer Netzhaut, und zwar nicht nur der räumlichen Anordnung der empfindenden Punkte auf ihr, sondern sogar ihrer Krümmung angeboren sei.

Zu erwähnen ist endlich noch, dass in einer Reihe von Fällen die binoculare Körperanschauung störend auf die Vergleichung der Distanzen im Gesichtsfelde einwirkt. Es macht sich hierbei geltend, dass unser natürliches Sehen Sehen von Körpern ist, und dass alle unsere Uebung darauf abzweckt, die Dimensionen und Lagen der gesehenen Körper richtig zu beurtheilen. Ich kann mit grosser Sicherheit erkennen, ob mein Zeigefinger dicker oder dünner ist, als eine an dem entgegengesetzten Ende des Zimmers befindliche Gasröhre, obgleich ein kolossaler Unterschied in der scheinbaren Grösse beider Körper vorhanden ist. Dagegen bin ich sehr unsicher, ob mein Zeigefinger, wenn ich ihn in einer bestimmten Entfernung vom Auge halte, dieselbe scheinbare Grösse hat, wie ein an der anderen Seite des Zimmers befindliches Buch, oder etwa wie der Mond, vorausgesetzt, dass ich die zu vergleichenden Objecte nicht im Gesichtsfelde nahe an einander bringe. Ich finde vielmehr, dass ich eine sehr starke Neigung habe, den Gesichtswinkel, unter dem der Finger erscheint, für viel kleiner als den des Buches oder des Mondes zn halten, bis ich beide ganz nahe zusammenbringe oder sich im Gesichtsfelde decken lasse.

Damit scheint es mir auch zusammenzuhängen, dass wir wie die Versuche

[1] Poggendorff's Annalen, 1863, CXX, 118 – 158.

von KUNDT zeigen, wenn wir eine horizontale Linie zu halbiren suchen, für das rechte Auge deren rechte Hälfte, für das linke Auge die linke zu gross zu machen pflegen. Bei einer Linie von 100 Millimeter Länge, aus 226 Millim. Entfernung gesehen, verlegte das linke Auge die Mitte im Durchschnitt von 40 Beobachtungen auf 50,33 Millimeter vom linken Ende entfernt, das rechte Auge nur 49,845 von demselben entfernt. Diese Abweichungen der scheinbaren von der wahren Mitte, 0,33 und 0,155 Millim. betragend, sind übrigens viel kleiner als die Abweichungen der einzelnen Beobachtungen vom Mittel, deren mittlerer Fehler 0,50 und 0,66 betrug, so dass eben nur in einer grossen Zahl von Versuchen die genannte Abweichung sichtbar wird.

Diese Abweichung kann, wie mir scheint, dadurch veranlasst sein, dass wir beim binocularen Betrachten einer halbirten Linie diese symmetrisch zum Kopfe vor die Mitte des Gesichts zu halten pflegen, und wir deshalb gewöhnt sind, die rechte Hälfte mit dem rechten Auge grösser zu sehen, die linke mit dem linken.

Zum Schluss der Beschreibung des Sehfeldes ist noch über seine Grenzen und Lücken zu reden. Seine Ausdehnung umfasst alle Punkte des uns umgebenden Raums, von denen durch die Pupille noch Licht eindringen und noch auf empfindende Theile der Netzhaut fallen kann. Ausgeschlossen vom Sehfelde sind diejenigen Theile des Raums, namentlich also die hinter uns liegenden, von denen niemals Licht auf dem normalen Wege unsere Netzhaut erreichen kann. Die Fläche unseres Sehfeldes entspricht also dem nach aussen projicirten Bilde unserer Netzhaut und die Grenze des Sehfeldes der Grenze der Netzhaut. Wir sind uns dieser Begrenzung bewusst, wir wissen, dass wir von den hinter uns liegenden Objecten durch das Gesicht nichts wahrnehmen, und können bei einiger Aufmerksamkeit auf das Feld des indirecten Sehens angeben, welche Gegenstände an dem Rande des Sehfeldes noch erscheinen, welche nicht, so weit die grosse Undeutlichkeit des Sehens mit den äussersten Theilen der Netzhaut dies eben erlaubt. Dabei ist zu bemerken, dass in der Empfindung ein wesentlicher Unterschied ist zwischen dem Theile des (verlängert gedachten) Sehfeldes, der überhaupt niemals gesehen werden kann, und dem sichtbaren Theile desselben, wenn er wegen Lichtmangels zeitweilig nicht gesehen wird. Bei Abschluss alles äusseren Lichtes haben wir ein bestimmt begrenztes dunkles Feld vor unsern Augen; wir sind uns aber wohl bewusst, dass wir dabei den hinter uns gelegenen Raum nicht dunkel sehen, sondern dass wir ihn gar nicht sehen. Die Empfindung des Dunkels ist die Empfindung des Ruhezustandes oder, wenn man will, der Mangel von Empfindung in Theilen unseres Sehnervenapparates, die erregt werden könnten, wenn ein Reiz auf sie wirkte. Ihr entspricht in der Wahrnehmung die Vorstellung vor uns gelegener Theile des Raums, welche unserem Auge kein Licht zusenden, was also eine bestimmte, wenn auch negative Aussage über den objectiven Zustand dieser Theile des Raums enthält. Den nicht sichtbaren Theilen des Raums entspricht aber auch kein empfindendes Organ, welches den Zustand seiner eigenen Ruhe bemerken und unterscheiden könnte. In der Wahrnehmung wird über sie gar nichts ausgesagt, als dass wir nichts über sie wissen, weder ob sie hell, noch ob sie dunkel seien. Beides ist wohl zu unterscheiden.

Nun giebt es aber auch innerhalb der äusseren Begrenzungslinie unseres Sehfeldes eine Lücke, entsprechend der für Licht unempfindlichen Eintrittsstelle unseres Sehnerven, wo wir nichts sehen. Die Lage und Ausdehnung dieser Stelle ist im Anfange des 18. Paragraphen bestimmt worden; dort wurde auch erwiesen, dass sie wirklich unempfindlich für Licht sei. Wir haben jetzt zu untersuchen, wie uns die entsprechende Stelle des Sehfeldes erscheint.

Der gewöhnliche Fall ist, dass wir gar nicht im Stande sind zu bemerken, dass eine Lücke im Sehfelde sei, oder unsere Aufmerksamkeit auf das, was in der Lücke erscheinen sollte, festzuheften. Dies ist nicht nur der Fall, wenn die Anschauung der Objecte, welche in die Lücke fallen, ergänzt wird durch die Wahrnehmungen des anderen offenen Auges, oder falls dies geschlossen ist, ergänzt wird durch Bewegungen des einen geöffneten Auges, wobei die Lücke ihren Platz im Gesichtsfelde stets wechselt und daher, was von den Objecten in dem einen Augenblicke nicht gesehen wird, im andern erkannt werden kann. Wir bemerken vielmehr auch bei festgeheftetem Blicke die Lücke nicht, wenn der der Lücke benachbarte Theil des Sehfeldes einen gleichmässig erhellten und gefärbten Grund darstellt; es erscheint uns vielmehr dann dieser ganze Theil des Feldes ohne Unterbrechung von der Farbe des Grundes ausgefüllt. Was für nicht gesehene Objecte sich dabei in der Lücke des Sehfeldes wirklich befinden, ist natürlich ganz gleichgültig. Diese verschwinden eben, wie schon oben gezeigt worden ist. Es ist dabei zu bemerken, dass wir überhaupt das indirecte Sehen gewöhnlich nicht benutzen, um uns über die Form, Grösse und Ordnung der in ihm gesehenen Gegenstände Auskunft zu verschaffen, sondern dass es hauptsächlich nur dazu dient, eine Art roher Skizze von der Umgebung des fixirten Punktes, auf den unsere Aufmerksamkeit gerichtet ist, zu geben und um unsere Aufmerksamkeit jeder etwa neu auftretenden oder ungewöhnlichen Erscheinung, die im seitlichen Theile des Sehfeldes zum Vorschein kommt, sogleich zuzulenken. Ein Theil des Sehfeldes nun, der wie der blinde Fleck niemals irgend welche, also auch keine auffallende Erscheinung darbieten kann, wird daher unter gewöhnlichen Umständen niemals Gegenstand der Aufmerksamkeit. Ja ich habe gebildete und unterrichtete Leute, selbst Aerzte, gekannt, denen es nicht gelang, sich von dem Verschwinden kleiner Objecte an dieser Stelle zu überzeugen. Wenn wir dann durch physiologisch optische Versuche uns üben, Gegenstände im indirecten Sehen zu erkennen, so sind es doch zunächst nur grössere durch Helligkeit oder Färbung oder Bewegung von ihrer Umgebung abstechende Gegenstände, auf die wir unsere Aufmerksamkeit, ohne den Fixationspunkt zu ändern, lenken und deren Ordnung wir erkennen können. Aber unsere Aufmerksamkeit einer bestimmten, durch gar keinen sinnlichen Eindruck ausgezeichneten Stelle, wie es die Lücke des Sehfeldes ist, wenn sie auf gleichmässig gefärbten Grund fällt, im indirecten Sehen zuzuwenden vermögen wir nicht.

Ich muss hierbei jedoch bemerken, dass ich in der letzten Zeit angefangen habe, beim Aufschlagen eines Auges gegen eine ausgedehnte weisse Fläche und bei kleinen Bewegungen des Auges oder bei eintretender Accommodationsspannung

den blinden Fleck als einen schattigen Fleck zu sehen, so dass, wenn ich mit der Spitze des Zeigefingers darauf hinweise, mir die Fingerspitze verschwindet. Es ist diess eine subjective Erscheinung, welche mit den auf Seite 198 und 199 beschriebenen Erscheinungen zusammenhängt, und bald wieder schwindet, wenn man das Auge unbewegt geöffnet hält. Das ist also nur eine scheinbare, nicht eine wirkliche Ausnahme von dem Gesagten, denn dabei ist das Sehfeld subjectiv nicht einförmig erregt, sondern die Nachbarschaft des blinden Flecks durch besondere Erscheinungen ausgezeichnet, welche die Aufmerksamkeit auf diese Stelle zu fixiren im Stande sind. Dazwischen kommt es doch immer wieder vor, dass ich ein helles Feld ansehe, ohne im Geringsten im Stande zu sein, ohne vorgängigen Versuch zu sagen, wo der blinde Fleck im Sehfelde liegt.

Anders verhält es sich, wenigstens für einen im indirecten Sehen etwas geübten Beobachter, wenn man Merkzeichen im Sehfelde anbringt, welche die Aufmerksamkeit gerade auf die Lücke hinzuleiten im Stande sind. Dazu kann man zum Beispiel sehr zweckmässig ein Kreuz brauchen, dessen verticaler Schenkel durch Farbe oder Helligkeit deutlich von dem horizontalen, beide ebenso vom Grunde unterschieden sind, und deren Kreuzungsstelle vom blinden Fleck ganz überdeckt werden kann. *Fig. 183* stellt ein solches Kreuz dar. Die Marke *a* bezeichnet den Fixationspunkt. Die Zeichnung ist aus 16 Centimeter Entfernung anzusehen. Um sich zu überzeugen, dass die Kreuzungsstelle ganz verschwindet, bedecke man sie mit einer farbigen Oblate, und wenn diese verschwunden ist, suche man bei gut fixirtem Blick zu ermitteln ob der schwarze oder der weisse Schenkel des Kreuzes im Fixationspunkte oben auf liegt. Volkmann [1] und die meisten andern Beobachter, die diesen Versuch angestellt haben, glaubten bald den einen, bald den anderen Schenkel oben liegen zu sehen, öfter [2] den horizontalen, vielleicht weil der horizontale Durchmesser der Lücke geringer ist, als der verticale. Macht man aber den horizontalen Schenkel kürzer und kürzer, so überwiegt schliesslich die Farbe des verticalen Schenkels. Ich habe selbst das früher auch so zu sehen geglaubt, seitdem ich aber durch vieles Beobachten eine grössere Uebung im indirecten Sehen erlangt habe, bin ich mir bei diesem Versuche ganz bestimmt bewusst, dass ich die Kreuzungsstelle nicht wahrnehmen kann. Auch Aubert, der einer der geübtesten Beobachter im indirecten Sehen ist, stimmt damit

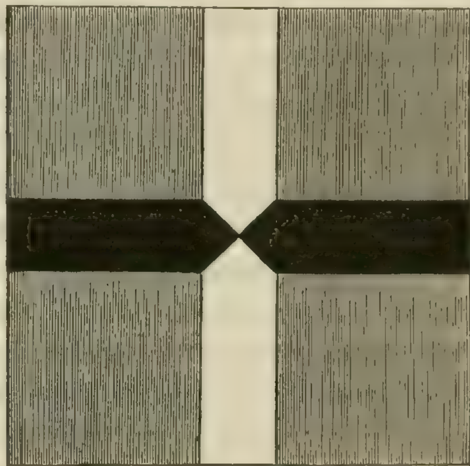


Fig. 183.

---

[1] Berichte der Kön. Sachs. Ges. d. Wissenschaften. 30 April 1853. S. 40.

[2] v. W. Wittich Studien über den blinden Fleck, Archiv fur Ophthalmologie 1863. IX. 3 p. 1—31

überein. Er sagt: „Trotz vielfacher Uebung im indirecten Sehen und vielfacher Wiederholung der von Weber, Volkmann und neuerdings von Wittich angegebenen Versuche muss ich schliesslich offen bekennen, dass ich zu keinem Urtheile darüber kommen kann, in welcher Weise das Gesichtsfeld in dieser Stelle ausgefüllt wird. Ob ein Kreuz, welches von einer gelben und blauen Linie gebildet wird, an der Kreuzungsstelle, wenn diese auf den blinden Fleck fällt, in der einen oder anderen Farbe erscheint, weiss ich trotz hundertfacher Wiederholung des Versuches nicht anzugeben, ebenso wenig, ob zwei Parallellinien in der Mitte zusammenrücken oder nicht, oder ob eine Kreislinie, mag sie dick oder dünn sein, sich zum Kreise schliesst oder nicht“ [1].

Schwieriger ist es, die Aufmerksamkeit auf die Lücke zu richten, wenn nur eine geradlinige Contour ohne Unterbrechung durch die Lücke hinläuft. Man schiebe ein schwarzes Blatt Papier, was durch eine verticale gerade Linie begrenzt ist, von der Schläfenseite des Sehfeldes her über ein weisses Blatt hin, auf welchem man einen Punkt mit einem Auge fixirt, bis ein Theil der Grenzlinie in die Lücke des Sehfeldes fällt. Die meisten Beobachter glauben in diesem Falle die gerade Begrenzungslinie ununterbrochen fortlaufend zu sehen; aber auch in diesem Falle habe ich mich neuerdings überzeugt, dass ich erkennen kann, wann und wo ich einen Theil der Linie nicht wahrnehme. Schiebe ich das schwarze Blatt vorwärts gegen den Fixationspunkt hin, so kann ich ganz genau den Augenblick erkennen, wo die beiden sichtbaren Enden der Begrenzungslinie zusammenschliessen. Schwieriger ist es, deutlich, zu erkennen wann derselbe Moment beim Zurückziehen des schwarzen Blattes an der Schläfenseite des blinden Flecks eintritt, weil hier das indirecte Sehen schon viel unvollkommener ist. Wunderlich ist dabei, aber charakteristisch für das Wesen der Erscheinung, dass ich nirgends eine Lücke zwischen dem weissen und schwarzen Felde sehe, obgleich ich erkenne, dass ich an einer Stelle die Begrenzungslinie nicht sehen kann, dass sich zwischen das Schwarz und Weisse nichts einschiebt, und ich doch nicht angeben kann, wo und wie geformt die Grenze sei. Auch kann ich nicht sagen, dass Weiss und Schwarz dort verwaschen in einander übergingen, denn das Grau dieses Uebergangs wäre wieder etwas bestimmt Wahrnehmbares. Ich kann es nur vergleichen mit dem Eindruck, den man hat, wenn man im halben Dunkel lichtschwache Objecte zu fixiren und zu erkennen sucht und dann durch die Nachbilder einzelne Theile der Zeichnung ausgelöscht werden.

Sehr viel leichter, als bei einer geraden Linie, erkenne ich die Lücke, wenn sie auf einen Theil einer Kreislinie oder auf die Peripherie einer Kreisfläche fällt; dabei kann ich auch ziemlich gut angeben, wieviel von dem Kreise fehlt.

Habe ich im Gesichtsfelde vor mir eine grosse Zahl verschiedenartiger kleiner Objecte, so bin ich im Stande, die Stelle das blinden Flecks sogleich zu erkennen an einer gewissen Unklarheit und Undeutlichkeit, wodurch sie sich

---

[1] Aubert Physiologie der Netzhaut. Breslau, 1865. S. 257—258.

unterscheidet. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn ich nach einem Gebüsch, einer gemusterten Tapete, einem mit Buchstaben bedruckten Blatte hinsehe.

Dem entsprechend muss ich behaupten, dass überhaupt keinerlei Empfindung dem blinden Flecke entspricht, und dass namentlich auch nicht etwa irgend welche Empfindungen aus der Nachbarschaft sich auf die Lücke des Sehfeldes übertragen, sondern bei genauer Beobachtung und bei Anwendung der nöthigen Hilfe, um die Aufmerksamkeit auf den blinden Fleck hinzulenken, kann man sich überzeugen, dass dort die Empfindung fehlt. Man sieht in der Lücke des Sehfeldes weder irgend etwas Helles oder Farbiges oder Dunkles, man sieht hier im strengen Sinne des Wortes Nichts, und dieses Nichts kann sich nicht einmal als Lücke und Grenze des Sichtbaren geltend machen; denn wenn die Lücke des sichtbaren Sehfeldes selbst sichtbar sein sollte, so müsste sie in irgend einer Qualität des Sichtbaren erscheinen, was sie nicht thut. Nur negativ können wir ihr Vorhandensein ermitteln dadurch, dass wir beobachten, welches die letzten Objecte sind, die wir noch sehen. Wenn wir dann ermitteln, dass diese im Raume nicht aneinanderstossen, so kommen wir zur Anerkennung der Lücke und ihrer räumlichen Lage und Grösse. Da nun aber hierzu Localisirung der Gesichtseindrücke nöthig ist, und diese nach unserer Auffassung erst durch Erfahrung erworben wird, so beruht dieses Auffinden der Lücke in der That auf einem Urtheil; sie wird nicht unmittelbar empfunden.

Mit der grösseren Lücke des Gesichtsfeldes hinter unserem Rücken verhält es sich übrigens ganz ähnlich, nur dass uns ihre Anwesenheit besser bekannt ist, als die des blinden Flecks, weil wir zu ihrer Ausfüllung zu keiner Zeit sinnliche Hilfsmittel gehabt haben, während die Lücke des blinden Flecks für gewöhnlich durch die Wahrnehmungen des andern Auges und durch die Bewegungen des Blicks genügend ausgefüllt und daher nicht als Mangel fühlbar wird. Auch die Grenze des Sehfeldes können wir nur negativ bestimmen, indem wir im indirecten Sehen aufsuchen, welche Objecte noch sichtbar sind, welche nicht. Wenn wir dagegen einen einförmigen Grund herstellen, zum Beispiel das Auge nach dem innern Augenwinkel drehen und ein durchscheinendes beleuchtetes Blatt Papier vorhalten, wobei dann gegen den äussern Augenwinkel hin nichts von den Theilen unseres Gesichts mehr sichtbar wird, sondern allein die weisse Fläche: dann ist es absolut unmöglich zu sagen, wo diese helle Fläche aufhört und wo das Nichtsehen anfängt. Wäre dagegen dort irgend ein dunkler oder farbiger Fleck auf dem Papier, so würden wir sogleich die Richtung bestimmen können, in dem wir diesen sehen. Auch hier also kann sich das nicht Sichtbare nicht als Grenze des Sichtbaren geltend machen und von ihm abheben.

Anders verhält es sich nun, wenn wir in Folge unserer Empfindungen uns Vorstellungen von den Objecten bilden. Der objective Raum und die darin enthaltenen Objecte können kein Loch haben entsprechend der Lücke unseres Sehfeldes. Wir befinden uns dann im Wesentlichen in der Lage von Jemandem, der ein befleckte oder durchlöchertes Gemälde betrachtet und daraus sich eine Anschauung von dem zu bilden sucht, was der Maler hat vorstellen wollen. Wenn hierbei ein Fleck auf irgend einen der untergeordneten Theile des Gemäl-

des fällt und die Ergänzung selbstverständlich ist, so wird der Betrachtende den Fleck vielleicht kaum beachten, oder wenigstens in seiner Vorstellung der Objecte durch ihn gar nicht gehindert werden und in dieser Beziehung den Fleck als nicht vorhanden betrachten können. Sollte der Fleck also auf eine einförmig gefärbte Fläche oder auf eine gleichmässig gemusterte Fläche fallen, so wird der Beschauer ohne Weiteres sich die Lücke in seiner Vorstellung mit der Farbe des Grundes ausfüllen, er müsste denn ganz besondere Gründe haben zu vermuthen, dass dort die Färbung oder das Muster ursprünglich abweichend gewesen sei. Und ebenso wird er die Ergänzung ohne alles Zögern und Schwanken machen, wenn der Fleck einen kleinen Theil einer geradlinigen Kante oder einer Kreisperipherie verdeckt. Erst wenn der Fleck auf wichtige Punkte des Gemäldes oder solche, deren Bedeutung nicht so ganz selbstverständlich ist, fällt, wird er die Aufmerksamkeit des Beschauers anziehen und ihn in der Vollendung seines Anschauungsbildes von den dargestellten Gegenständen stören.

Dieser Vergleich kann das Verhältniss ungefähr klar machen; namentlich wenn man sich denkt, dass der Fleck bei einem reichen und interessanten Gemälde auf seitlich gelegene und ganz unwichtige Nebensachen des Gemäldes fällt und nicht durch seine Farbe oder Helligkeit im Stande ist, die Aufmerksamkeit des Beobachters anzuziehen. Dann wird er möglicher Weise ebenso unentdeckt bleiben, wie die Lücke im Sehfelde es gewöhnlich ist. Der Vergleich hinkt nur insofern, als der Fleck auf dem Gemälde etwas Sichtbares ist, auf welches die Aufmerksamkeit vollkommen leicht gefesselt werden kann, wenn sie einmal darauf hingelenkt war, während die Lücke des Gesichtsfeldes nicht die Qualität von etwas Sichtbarem hat und es ganz gegen unsere Gewöhnung und Uebung ist, die Aufmerksamkeit im Felde des indirecten Sehens anders als auf einzelne positiv auffallende Phänomene zu richten. In beiden Fällen bilden wir uns aus den vorhandenen positiven Momenten der Empfindung unsere Vorstellung von den Objecten aus, so gut es eben geht; nur dass wir bei der Lücke des Sehfeldes sehr viel schwerer auf den Mangel des Anschauungsmaterials aufmerksam werden, als bei dem Fleck des Gemäldes. VOLKMANN sagt daher in dieser Beziehung mit Recht, dass man die Lücke im Sehfelde durch einen Act der Einbildungskraft ausfüllt; nur muss man hinzufügen, dass diesem Acte der Einbildungskraft nicht die volle Evidenz der sinnlichen Anschauung zukommt, wenn auch in diesem Falle allerdings schwerer als in anderen ähnlichen Fällen zu ermitteln ist, dass ein Mangel des sinnlichen Materials stattfindet. Eines der hübschesten Beispiele, was VOLKMANN für diese Ergänzung durch die Einbildungskraft anführt, ist, dass wenn man die Lücke auf die bedruckte Seite eines Buches fallen lässt, man sie mit Druckschrift ausgefüllt zu sehen glaubt, welche man freilich nicht lesen kann. Aber allerdings ist diese Ausfüllung nur so lange scheinbar vorhanden, bis man sich durch genauere Aufmerksamkeit überzeugt, dass man an der betreffenden Stelle gar nichts wahrnimmt. Die Thätigkeit der Einbildungskraft geht also keineswegs so weit, dass dadurch die fehlende sinnliche Empfindung ersetzt und vorgespiegelt würde.

Es ist nun noch zu untersuchen, wie die räumlichen Abmessungen durch das Augenmaass für die Punkte nahe der Lücke ausfallen. In dieser Beziehung

fallen die Aussagen verschiedener Beobachter sehr verschieden aus. Einige, wie namentlich v. Wittich, sehen die der Lücke nächstgelegenen Objecte gegen die Lücke hingezogen und diese dadurch ausgefüllt, Andere, wie E. H. Weber, Volkmann, ich selbst, sehen die umgebenden Theile in ihrer richtigen Lagerung, abgesehen von den Verziehungen, welche die seitlichen Theile des Gesichtsfeldes überhaupt erleiden. Bei wieder Anderen, wie bei Funcke, wechselt es, so dass sie unter etwas veränderten Umständen bald das eine sehen, bald das andere.

Die Unterschiede zeigen sich namentlich deutlich bei folgendem von Volkmann erfundenen Versuche: Man setze neun Buchstaben, so wie *A* bis *I* in *Fig. 184*, und fixire mit dem rechten Auge aus einem Abstande von 20 Centimeter das Kreuzchen bei *k*, so wird *E* in die Lücke fallen. Die Grösse der Lücke ist für mein Auge unter diesen Umständen durch den gestrichelten Kreis angegeben, in dessen Mitte *E* steht. Dadurch, dass man eine kleine rothe Oblate auf *E* legt und diese nach allen Seiten hin so weit vorschiebt, dass sie eben anfängt sichtbar zu werden, kann man controlliren, wie gross die Lücke ist und ob auch keiner der anderen Buchstaben dadurch verdeckt wird. Sehr gut lässt sich ein entsprechendes Muster auch herstellen mittels verschiedenfarbiger Oblaten, welche man an Stelle der Buchstaben hinlegt. An einem Muster, wie *Fig. 184*, sehen Volkmann und ich selbst die neun Buchstaben *ABC DF GHI* als Seiten eines Quadrats, in geraden Linien stehend, wie sie wirklich stehen, und die Mitte desselben leer. Wittich dagegen sieht statt der geraden Seiten des Quadrats vier gegen die Mitte convexe Bögen *ABC*, *CFI*, *IHG*, *GDA*. Funcke [1] sieht sie convex wie Wittich, wenn keine anderen geraden Linien in der Nähe sind, mit denen er ihre Form vergleichen kann, dagegen gerade gestreckt, wie Volkmann, wenn durch *k* oder zwischen *k* und *ADG* eine verticale gerade Linie gezogen wird, oder auch, wenn die Reihe *CFI* durch ein weisses Papier verdeckt wird.

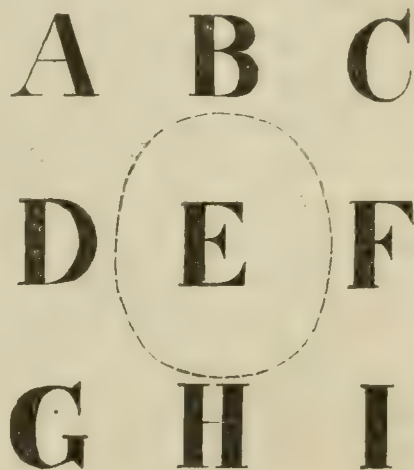


Fig. 184.

Eine gerade Linie, deren Mitte in die Lücke fällt, erscheint v. Wittich verkürzt, während E. H. Weber, Volkmann und ich sie unverkürzt sehen. Eine Kreisfläche, die nicht ganz, aber beinahe ganz vom blinden Flecke gedeckt wird, deren Rand man aber ringsum sehen kann, erscheint mir ebenso gross, wie eine ebenso weit nach der Nasenseite des Fixationspunktes liegende ähnliche Fläche. Uebrigens glaube ich, wie schon Weber und Volkmann fanden, die

[1] Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br. Bd. III. Heft 3, S. 12 u. 13.

ganze Fläche in der Farbe des Randes zu sehen, selbst wenn von diesem nur ein schmaler Streif ausserhalb der Lücke liegt. Ja, wenn die Kreisscheibe von engbedrucktem Papier geschnitten ist, so glaube ich sie in ganzer Ausdehnung mit Buchstaben bedeckt zu sehen, bis ich die Aufmerksamkeit genau auf sie richte, wo ich dann erkenne, dass ich in ihrer Mitte nichts unterscheide.

Funcke berichtet, dass wenn die Lücke auf bedrucktes Papier fällt und er sich diesseits und jenseits derselben zwei hervorstechende Buchstaben gemerkt hat, diese einander genähert erscheinen. Auch in diesem Falle sehe ich die Buchstaben in ihrer richtigen Distanz.

Diese Widersprüche lassen sich wohl daraus erklären, dass wir als Ergänzung für die Beurtheilung der räumlichen Dimensionen des Sehfeldes, welche hauptsächlich durch die Bewegungen des Auges erlernt ist, auch noch die Weber'schen Empfindungskreise berücksichtigen, namentlich für kleine, einander nahe Objecte, für welche die erstere Art der Beurtheilung vielleicht unvollkommenere Data giebt. Ob zwei seitlich liegende schwarze Punkte, die auf verschiedenen Seiten des Fixationspunktes sich befinden, von ihm gleich weit abstehen oder nicht, können wir nicht mit derselben Genauigkeit entscheiden, als wenn beide auf derselben Seite und nahe aneinander liegen und zwischen ihnen noch ein weisser Fleck des Grundes sichtbar ist, dann ist es nicht zweifelhaft, welcher dem Fixationspunkt näher ist, welcher ferner.

Nun stimmen in den übrigen Theilen des Sehfeldes beiderlei Bestimmungsweisen nothwendig überein; in der Gegend des blinden Flecks dagegen fehlen die Eindrücke, welche wir zwischen denen des Randes der Lücke erwarten sollten und welche das sinnliche Zeichen ihrer räumlichen Trennung sein sollten. Andererseits können wir mittels der Bewegungen des Auges doch richtige Erfahrungen über die wirkliche Lage der Randpunkte der Lücke machen und sie als getrennt erkennen. Daher ist es möglich, dass verschiedene Beobachter, die bald mehr auf dieses, bald mehr auf jenes Moment zu achten gewohnt sind, verschieden urtheilen, und dass selbst bei einem und demselben Beobachter nebensächliche Verhältnisse für das eine oder andere den Ausschlag geben.

Ich habe früher bemerkt, dass im Allgemeinen die Lücke eines jeden Auges beim gewöhnlichen zweiäugigen Sehen ausgefüllt wird durch das, was das andere Auge an jener Stelle des Sehfeldes wahrnimmt. Diese Regel erleidet aber, wie Volkmann gezeigt hat, ebenfalls Ausnahmen. Bezeichnen wir den blinden Fleck des einen Auges mit a, die entsprechende Stelle des andern Auges mit α, die Umgebung von a mit b, die von α mit β, die den beiden Stellen a und α entsprechende Stelle im Gesichtsfelde mit A, ihre Umgebung mit B, so lassen sich leicht folgende Versuche machen:

1. Wir sehen mit dem ersten Auge auf weisses Papier und schliessen das andere Auge, so empfinden wir

   auf a: Nichts, auf b: Weiss
   auf α: Dunkel, auf β: Dunkel

   und meinen zu sehen

   auf A: Weiss, auf B: Weiss.

2. Wir sehen mit beiden Augen auf weisses Papier, halten aber vor das zweite ein blaues Glas; wir empfinden also

auf a: Nichts, auf b: Weiss
auf α: Blau, auf β: Blau

und meinen zu sehen

auf A: Blauweiss, auf B: Blauweiss.

3. Aehnlich fällt der Versuch aus, wenn wir mit beiden Augen durch verschiedenfarbige Gläser sehen, wobei ein ungleichförmiges und wechselndes Gemisch beider Farben im Sehfelde erscheint; auch dann zeichnet sich A von dem Rest des Feldes in keiner Weise aus.

In den bisherigen Fällen, wo die Stelle α ebenso beleuchtet war, wie β, glaubten wir die Lücke in der Farbe des Grundes zu sehen, wobei dann das sonderbare Resultat eintritt, dass die Stelle A des Sehfeldes, die in dem einen Auge gar keine Empfindung, im andern die von Schwarz oder Blau hervorruft, uns weiss oder blauweiss erscheint.

4. Nun blicken wir nach einem schwarzen Blatte, auf dem ein weisser Kreis liegt, der der Lücke a entspricht. Wir empfinden

auf a: Nichts, auf b: Schwarz
auf α: Weiss, auf β: Schwarz.

Wir sehen

auf A: Weiss, auf B: Schwarz.

Halten wir vor das zweite Auge ein blaues Glas, so tritt hierbei statt Weiss natürlich überall Blau ein.

5. Wir blicken nach einem weissen Felde, auf dem sich ein schwarzer Fleck, der Lücke a entsprechend, befindet. Wir empfinden

auf a: Nichts, auf b: Weiss
auf α: Schwarz, auf β: Weiss

und sehen

auf A: Schwarz, auf B: Weiss.

6. Nachdem wir die Fixation des vorigen Versuchs eine Weile unverändert unterhalten haben, blicken wir auf einen andern Punkt der weissen Fläche, dann erscheint ein helleres weisses Nachbild des schwarzen Flecks, welches ebenfalls dem Orte der Lücke entspricht. Also auch der schwache Unterschied zwischen dem etwas helleren Weiss des Nachbildes und dem etwas matteren des Grundes genügt, den Gesichtseindruck der Lücke zu bestimmen. Dadurch können nun auch scheinbare Widersprüche mit Versuch 3 eintreten.

7. Die Bedingungen des vorigen Versuchs werden dahin abgeändert, dass ich vor das Auge ab ein grünes Glas, vor $\alpha\beta$ ein rothes setze und erst so fixire, dass der schwarze Fleck der Lücke a entspricht, dann sehe ich den Fleck schwarzgrün, fast als ob ich ihn durch das grüne Glas mit der Lücke a sähe. In Wahrheit aber ist das eine Contrastfarbe im andern Auge auf α gegen den rothen Grund β. Wenn ich eine kleine Weile fixirt habe und dann eine andere Stelle des Papiers fixire, so sehe ich die Stelle A des Gesichtsfeldes rein roth, scheinbar mit dem Auge $\alpha\beta$ allein. Aber

in diesem Falle ist es hier das heller rothe Nachbild des vorhergesehenen Schwarz, wodurch sich α vor β auszeichnet und daher den Eindruck bestimmt.

Aus diesen letzteren Versuchen scheint also hervorzugehen, dass der Eindruck auf α das Gesammtbild wenigstens dann bestimmt, wenn α von β durch Helligkeit und Farbe deutlich unterschieden ist. Doch ist auch in solchen Fällen α nicht allein bestimmend.

8. Ich blicke nach einem hellgrauen Papier, auf dem eine weisse Oblate liegt, der Lücke a entsprechend; vor das geschlossene Auge $\alpha\beta$ bringe ich ein rothes Glas und öffne es dann. Nun habe ich in der Empfindung

auf a: Nichts, auf b: Grau

auf α: Roth, auf β: Mattes Roth.

Ich meine zu sehen:

auf A: Rothweiss auf B: Grauroth.

Das Roth auf α, wenn das Auge ab geschlossen ist, ist entschieden gesättigter, als es in A ist, wenn ab geöffnet ist, trotzdem a keinen Eindruck empfängt. Das Entsprechende sieht man auch bei Anwendung andersfarbiger Gläser. Der Unterschied wurde noch deutlicher, wenn ich nahe neben die weisse Oblate eine rothe legte, die durch das rothe Glas gesehen ebenso aussah, wie die weisse. Die rothe Oblate muss aber, bis das Auge hinter dem rothen Glase geöffnet wird, verdeckt werden durch einen dem Grunde gleichfarbigen Schirm, damit sie kein Nachbild entwickelt, welches ihr Roth abschwächt und grau macht, wenn es zur Vergleichung kommt.

In diesem letzteren Falle ist es unverkennbar der Einfluss des grauen Grundes in b, der uns a weisslich sehen lässt. Es lassen sich alle diese Erscheinungen auf das Gesetz zurückführen, dass wir mit beiden Augen die der Lücke entsprechende Stelle A des Sehfeldes um so viel heller oder dunkler als den Grund B zu sehen glauben, wie wir in dem anderen Auge (α und β) sie wirklich heller oder dunkler sehen. Die gemeinsame Färbung des Sehfeldes α und β wird nicht übergetragen auf die Lücke des andern Auges, wohl aber die Differenz zwischen α und β auch als für a und b bestehend angeschaut. Aehnliche Verhältnisse werden wir unten in der Lehre vom binocularen Contraste wiederfinden.

Einigen Anstoss haben diejenigen subjectiven Erscheinungen erregt, welche gerade an der Eintrittsstelle des Sehnerven auftreten, wie die Lichtgarben bei schneller Bewegung des Auges und die hellen oder dunklen Kreisflächen bei elektrischer Durchströmung. Zu erklären sind sie nur, wenn man annimmt, dass dabei die den Sehnerven unmittelbar umgebenden Netzhauttheile betroffen sind. Bei der elektrischen Durchströmung erklärt sich dies auch wohl einfach dadurch, dass die hinter der Sclerotica liegende schlecht leitende, sehnige Masse des Sehnerven die elektrische Durchströmung der unmittelbar davor liegenden Netzhauttheile erschwert und diese deshalb gegen das übrige Gesichtsfeld contrastiren. Aufsteigender Strom, der das Gesichtsfeld licht macht, lässt den schlecht leitenden Sehnerveneintritt dunkel erscheinen, absteigender, der das Feld dunkel und röthlichgelb macht, dagegen licht und blau.

Für die leuchtenden Garben bei schneller Bewegung des Auges kann man den Beweis für die Richtigkeit dieser Erklärung nicht führen, wohl aber für die entsprechenden dunklen Flecke, welche man sieht, wenn man die Augen stark seitwärts und gegen ein gleichmässig erleuchtetes Feld wendet. Hat man die Augen nach links gewendet, so sieht man mit dem rechten Auge einen dunklen Fleck nach rechts hin im Gesichtsfelde, dessen rechter Rand sehr gut begrenzt ist, der linke, gegen die Mitte des Gesichtsfeldes gekehrte dagegen sehr unbestimmt. Hier ist auch die Lücke des Gesichtsfeldes; denn wenn man eine Bleistiftspitze vor dieses innere Ende des dunklen Flecks schiebt, verschwindet sie; nicht aber in dem übrigen Theile des dunklen Flecks.

Dagegen sieht man vor dem nach links gewendeten linken Auge den dunklen Fleck zwischen dem Fixationspunkte dieses Auges und dem blinden Flecke liegen. Bei nach links gewendeten Augen wird also die Netzhaut in beiden Augen an der linken Seite des Sehnerven (im Gesichtsfelde ist der dunkle Fleck nach rechts gewendet) unempfindlicher gemacht. Dies ist die Seite, wo der Nervenstamm gegen die Sclerotica hingebogen wird, diese wahrscheinlich etwas einbiegt und so die Netzhaut verzerrt. Für diese dunklen Flecke lässt sich also erweisen, dass sie nicht der eigentlichen Eintrittsstelle des Sehnerven entsprechen, sondern daneben liegen. Die lichten Erscheinungen im dunklen Felde werden hier wohl, ebenso wie bei den Druckbildern, dieselbe Stelle einnehmen; auch meine ich bei darauf besonders gerichteter Aufmerksamkeit erkannt zu haben, dass die Spitze der einen Garbe bis zum Fixationspunkte hinreicht, wie der eine dunkle Fleck. Hiernach sind die oben S. 198 und 199 gemachten Angaben über den Ort dieser Flecke zu verbessern.

Wenn man nach zwei ungleich weit entfernten Punkten des Gesichtsfeldes hinsieht, für welche das Auge also auch nicht gleichzeitig vollkommen accommodirt sein kann, so sieht man wenigstens den einen derselben als Zerstreuungsbild. Der Strahlenkegel, welcher dieses Zerstreuungsbild bildet, wird abgegrenzt durch die Oeffnung der Pupille, und es liegt derjenige Strahl in der Axe dieses Strahlenkegels, welcher durch den Mittelpunkt der Pupille gegangen ist. Wenn also auf denselben Netzhautpunkt a die Mittelpunkte zweier Zerstreuungskreise ungleich weit entfernter Punkte zusammenfallen, oder ein punktförmiges Bild mit der Mitte des Zerstreuungsbildes des zweiten Punktes, so müssen diejenigen beiden Strahlen beider Objectpunkte, welche durch den Mittelpunkt der Pupille gegangen sind, ganz zusammenfallen, oder derjenige Strahl, welcher durch beide Objectpunkte geht, muss nachher durch den Mittelpunkt der Pupille gehen.

Der Mittelpunkt der Pupille befindet sich nun im Innern des optischen Systems des Auges, vor ihm liegt die Hornhaut, hinter ihm die Krystallinse. Die Strahlen erleiden also eine Brechung, ehe sie zu diesem Punkte gelangen, und werden auch noch wieder von ihrem Wege abgelenkt, nachdem sie ihn verlassen haben.

Strahlen, welche von dem wirklichen Mittelpunkte der Pupille ausgehen, werden in der Hornhaut so gebrochen, dass sie nachher von dem Bilde des Mittelpunkts der Pupille, welches die Hornhaut entwirft, auszugehen scheinen werden. Umgekehrt Strahlen, welche ausserhalb des Auges gegen das Bild des Mittelpunkts der Pupille convergiren, werden durch den Mittelpunkt der Pupille selbst hindurchgehen.

Das Bild, welches bei der Brechung der Strahlen in der Hornhaut vom Mittelpunkte der Pupille entworfen wird, ist also derjenige Punkt, welchen wir den

Kreuzungspunkt der Visirlinien genannt haben. Wenn zwei leuchtende Punkte vor dem Auge in einer durch diesen Punkt gehenden geraden Linie liegen, so fallen die Mittelpunkte ihrer Zerstreuungskreise auf der Netzhaut zusammen.

Für das schematische Auge, welches auf S. 111 berechnet ist, habe ich auch den Abstand des Kreuzungspunktes der Visirlinien von der Hornhaut in Millimetern berechnet:

	Fernsehend	Nahesehend.
1. Abstand des Mittelpunkts der Pupille	3,6 Millim.	3,2 Millim.
2. Abstand des Kreuzungspunktes der Visirlinien von der Hornhaut	3,036	2,661
3. Abstand des Kreuzungspunktes von dem Mittelpunkte der Pupille	0,564	0,539

In anderer Weise bestimmt sich der Scheitelpunkt der Gesichtswinkel, wenn die Accommodation des Auges fortdauernd den beobachteten Objecten angepasst wird, weil nämlich bei der veränderten Accommodation des Auges die Knotenpunkte selbst sich verrücken. Wir finden diesen Scheitelpunkt unter diesen Bedingungen in folgender Weise am einfachsten.

Setzen wir voraus, es sei der Punkt A, *Fig. 185*, der gesuchte Scheitelpunkt der Gesichtswinkel, DA und CA zwei durch ihn gezogene gerade Linien, welche gleiche Winkel mit der optischen Axe EA machen, und mit ihr in einer Ebene liegen. Es wird verlangt, dass Objecte wie die beiden Pfeile, wenn ihre Endpunkte in den Linien DA und CA liegen, gleich grosse Netzhautbilder FG geben, wenn das Auge für die Endpunkte der betreffenden Objecte richtig accommodirt ist. Nun sei B_0 das Bild von A im fernsehenden Auge, B_1 dasselbe im nahesehenden Auge. Wenn wir die Linien DA und CA als Strahlen betrachten, so werden diese so gebrochen werden, dass sie im Glaskörper von B_0 oder B_1 aus divergiren, um beziehlich nach F und G zu gehen.

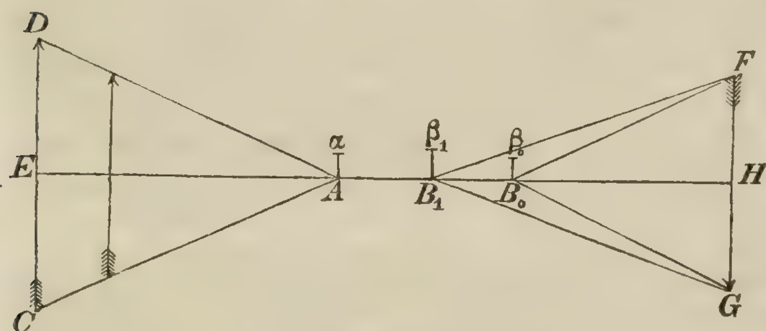


Fig. 185.

Nun denke man sich im Punkte A ein kleines, zur Axe senkrechtes Object α, und in B_0, beziehlich B_1 dessen optische Bilder β_0, beziehlich β_1, so findet nach S. 50, Gleichung 7d), folgende Beziehung zwischen den Winkeln DAC, FB_0G, FB_1G und diesen Bildern statt

$$n_1 \alpha \tang \frac{DAC}{2} = n_2 \beta_0 \tang \frac{FB_0G}{2}$$
$$= n_2 \beta_1 \tang \frac{FB_1G}{2},$$

wo n_1 und n_2 die Brechungsverhältnisse von Luft- und Glaskörper sind. Da nun

$$\tang \frac{FB_0G}{2} = \frac{FH}{HB_0}$$
$$\tang \frac{FB_1G}{2} = \frac{FH}{HB_1},$$

so folgt

$$\beta_0 : \beta_1 = HB_0 : HB_1.$$

Der gesuchte Scheitelpunkt der Gesichtswinkel ist also durch die Eigenschaft charakterisirt, dass wenn in ihm ein kleines, zur Axe senkrechtes (virtuelles) Object liegt, dessen Bild bei den Veränderungen der Accommodation seinem Abstande von der Netzhaut proportional wächst.

Wenn man für die mittleren Werthe der optischen Constanten des fernsehenden und nahesehenden Auges, welche auf S. 111 gegeben sind, die Lage dieses Punktes berechnet, so findet man seinen Abstand gleich 2,942 Millimeter von der Hornhaut, so dass er fast genau zusammenfällt mit dem vorher berechneten Kreuzungspunkt der Visirlinien des fernsehenden Auges, dessen Abstand gleich 3,036 Mm. von der Hornhaut gefunden war. Bei den praktischen Anwendungen können wir daher beide Punkte als zusammenfallend betrachten, besonders da so kleine Unterschiede, wie der hier gefundene, bei dem bisher erreichbaren Grade der Genauigkeit unserer Kenntniss der optischen Constanten des Auges nicht zu verbürgen sind.

Für die Grösse der Gesichtswinkel des unbewegten Auges würde es danach keinen Unterschied machen, ob wir seine Accommodation den zu beobachtenden Punkten anpassen oder das Auge für unendliche Ferne einrichten.

J. B. Listing [1] hat den Unterschied des Winkels, den zwei von zwei Objectpunkten nach dem Knotenpunkte des Auges gezogene Linien bilden, von demjenigen, welchen die von denselben Objectpunkten nach dem Drehpunkte des Auges gezogenen Linien bilden, die Parallaxe zwischen der scheinbaren Lage der Objecte bei directem und indirectem Sehen genannt. Ich würde es vorziehen, diesen Namen so anzuwenden, dass als Spitze des ersten Winkels der Kreuzungspunkt der Visirlinien [2] gebraucht würde, weil zwei punktförmige Objecte im indirecten Sehen gleiche Lage haben, wenn sie in derselben Visirlinie liegen.

Diese Parallaxe ist gleich Null, wenn die Objecte unendlich entfernt sind; weil für unendlich weit entfernte Objecte die Schenkel der beiden zu vergleichenden Winkel einander paarweise parallel werden. Ist nur das eine Object unendlich entfernt, so bezeichnet die genannte Parallaxe, um wie viel sich scheinbar das nähere Object vor einem unendlich entfernten Hintergrunde verschiebt, wenn man den Blick auf dasselbe hinrichtet.

Um für diesen verhältnissmässig einfachsten Fall die Grösse der genannten Parallaxe vergleichen zu können mit den Ungenauigkeiten der Accommodation, sei in *Fig. 186* o der Drehpunkt des Auges, $oc = oe = \sigma$ die Entfernung des Kreuzungspunktes der Visirlinien. In der Richtung oa liege das fernere Object, b sei das nähere, so wird b, wenn es direct fixirt wird, in der Richtung bg erscheinen und die in dieser Richtung liegenden Theile des unendlich entfernten Hintergrundes decken. Wenn aber in der Richtung oa fixirt wird, wird der Kreuzungspunkt der Visirlinien in e liegen und b in der Richtung ef erscheinen. Der Winkel $ebc = fbg = \varepsilon$

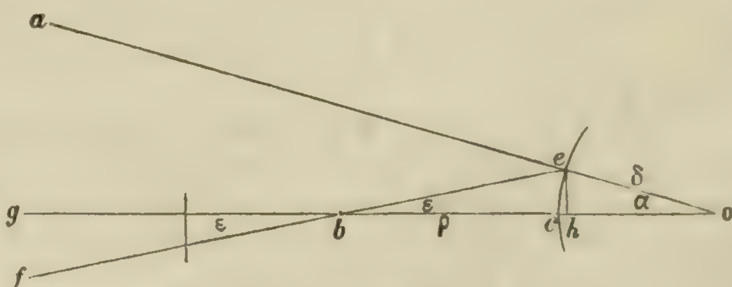


Fig. 186.

[1] Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen 1845. S. 14—16.

[2] Bei Listing sind Visirlinien die vom Objecte nach dem Drehpunkt des Auges gezogenen Linien.

ist also die Parallaxe zwischen directem und indirectem Sehen. Bezeichnen wir den Abstand des Punktes b vom Punkte c mit ϱ, so ist

$$\tang \varepsilon = \frac{eh}{hb} = \frac{\sigma \sin \alpha}{\varrho + \sigma (1 - \cos \alpha)}.$$

Der Durchmesser p des Zerstreuungskreises von b in einem für unendliche Ferne accommodirten Auge ist nach S. 99, Gleichung 1 b), wenn P der Durchmesser der durch die Krystallinse gesehenen Pupille und H der Abstand des vorderen Brennpunktes vom Kreuzungspunkte der Visirlinien ist

$$p = \frac{P \cdot H}{\varrho}$$

und wenn η der Winkel ist, unter dem der Radius des Zerstreuungskreises auf den unendlich entfernten Hintergrund entworfen erscheint, f aber der Abstand des Knotenpunktes der Hornhaut vom hintern Brennpunkte, so ist

$$\tang \eta = \frac{p}{2f} = \frac{P \cdot H}{2\varrho \cdot f}$$

und wenn wir in dem Werthe von $\tang \varepsilon$ die Grösse σ (10,5 Millimeter) gegen ϱ (die Entfernung des Objectes) vernachlässigen, so ist

$$\tang \varepsilon = \frac{\sigma \sin \alpha}{\varrho}$$

und daher $\eta > \varepsilon$, so lange

$$\frac{PH}{2\sigma f} > \sin \alpha.$$

Es ist aber nach den früher gegebenen Werthen für das fernsehende Auge

$$\begin{aligned} H &= 15{,}869 \text{ Millimeter}, \\ f &= 15{,}007 \quad \text{„} \\ \sigma &= 10{,}521 \quad \text{„} \end{aligned}$$

P kann schwanken zwischen etwa 3 und 6 Millimeter; dem ersteren Werthe entspricht

$$\alpha < 8^0{,}40, \quad \text{dem zweiten } \alpha < 17^0{,}33.$$

So lange die Bewegung des Auges nicht grösser ist, als diese Werthe des Winkels α, so lange ist die Verschiebung beim Uebergang vom indirecten zum directen Sehen nicht grösser als der Radius des Zerstreuungskreises, unter dem der nähere Punkt erscheint.

Wenn man dabei berücksichtigt, wie ausserordentlich undeutlich das indirecte Sehen in 8° Entfernung vom Blickpunkte ist, so wird dadurch begreiflich, dass wir nur ausnahmsweise, wenn irgend ein sehr heller Punkt hinter dem Rande eines dunklen Schirms auftaucht, die Veränderung des Bildes, welche von den Bewegungen des Auges abhängt, bemerken.

Ich lasse hier noch zwei wichtige Actenstücke für die Lehre von dem Verständniss der Gesichtserscheinungen folgen, welche die Beobachtungen von Cheselden und Wardrop an zwei Blindgeborenen berichten, denen erst in späterem Alter das Gesicht durch eine Operation wiedergegeben wurde. Cheselden operirte einen Knaben von 13 Jahren, welcher mit sehr stark getrübten Krystallinsen (grauem Staar) geboren war.

Cheselden [1] berichtet Folgendes über seine Fähigkeit, Formen zu unterscheiden: „Anfangs, nachdem er sein Gesicht bekommen hatte, wusste er so wenig über Entfernungen zu urtheilen, dass er sich vielmehr einbildete, alle Sachen, die er sähe, berührten seine Augen, wie das, was er fühlte, seine Haut. Keine Sachen waren ihm so angenehm, als glatte und regelmässige (vielleicht wegen des einfacheren und leichter zu analysirenden Gesichtseindrucks, oder wegen des Glanzes?), ob er wohl von ihrer Gestalt nicht urtheilen oder errathen konnte, was ihm an einer Sache gefiele. Er machte sich keinen Begriff von der Gestalt irgend einer Sache, unterschied auch keine Sache von der anderen, so verschieden sie auch an Gestalt und Grösse waren; wenn man ihm aber sagte, was das für Dinge wären, die er zuvor durchs Gefühl erkannt hatte, so betrachtete er sie sehr aufmerksam, um sie wieder zu kennen; weil er aber auf einmal zu viel Sachen zu lernen hatte, vergass er immer wieder viel davon und lernte, wie er sagte, in einem Tage tausend Dinge kennen und vergass sie wieder. Zum Exempel, er hatte oft vergessen, welches die Katze und welches der Hund war, und schämte sich darum weiter zu fragen; fing also die Katze, die er durch das Gefühl kannte, betrachtete sie sehr genau, setzte sie nieder und sagte: „So, Miezchen, nun will ich dich ein andermal kennen“. — Man glaubte, er würde bald verstehen lernen, was Gemälde vorstellten, es zeigte sich aber das Gegentheil. Denn zwei Monate, nachdem ihm der Staar gestochen war, machte er plötzlich die Entdeckung, dass sie Körper mit Erhöhungen und Vertiefungen darstellten; bis dahin hatte er sie nur als buntscheckige Flächen angesehen. Dabei aber erstaunte er nicht wenig, dass sich die Gemälde nicht so anfühlen liessen, wie die Dinge, welche sie vorstellten, und dass die Theile, welche durch ihr Licht und Schatten rund und uneben aussahen, flach, wie die übrigen, anzufühlen waren. Er fragte, welcher von seinen Sinnen ihn betröge, das Gefühl oder das Gesicht. Als man ihm seines Vaters Bild in einem Angehänge an seiner Mutter Uhr zeigte und ihm sagte, was es wäre, erkannte er es für ähnlich, wunderte sich aber sehr, dass ein grosses Gesicht sich in einem so kleinen Raume vorstellen liess, welches ihm, wie er sagte, so unmöglich würde geschienen haben, als einen Scheffel in eine Metze zu bringen.

„Anfangs konnte er wenig Licht vertragen und hielt alles, was er sah, für ungemein gross; als er aber grössere Sachen sah, hielt er jene für kleiner, weil er sich gar keine Linien ausserhalb des Umfangs, den er sah, vorstellen konnte. Dass das Zimmer, worin er wäre, ein Theil des Hauses sei, sagte er, wüsste er wohl, könnte aber nicht begreifen, wie das ganze Haus grösser als das Zimmer aussehen könnte.

„Ein Jahr, nachdem er sein Gesicht wiedererhalten hatte, brachte man ihn auf die Dünen von Epsom, wo er eine weite Aussicht hatte; diese ergötzte ihn gar sehr und war ihm, wie er sagte, eine neue Art von Sehen.

„Als ihm der Staar an dem andern Auge gestochen ward, kamen ihm, wie er sagte, die Sachen mit diesem Auge grösser vor, doch nicht so gross, als sie ihm anfangs mit dem ersten erschienen waren. Wenn er einerlei Sache mit beiden Augen ansah, so kam sie ihm noch einmal so gross vor, als mit dem zuerst erhaltenen allein; aber doppelt sah er nichts, soviel man entdecken konnte.“

Hierbei ist zu bemerken, dass auch bei einer noch so undurchsichtigen Linse der Blinde immer im Stande war zu lernen, wie er die Augen bewegen musste, um von der Sonne den hellsten Eindruck zu empfangen, d. h. nach der Sonne hinzusehen. Also in der Beurtheilung der Richtung der Objecte aus der Richtung des Blicks nach ihnen hin konnte er nicht als ganz ungeübt betrachtet werden.

---

[1] *Phil. Transact.* 1728. XXXV, p. 447; Smith *Opticks Remarks*, p. 27.

Ja, es ist selbst unwahrscheinlich, dass die Linse jemals das Licht so vollständig gleichmässig nach allen Richtungen hin verstreue, dass nicht doch am Ende die Theile der Netzhaut, welche dem Orte, wo der Focus der Strahlen sich bilden sollte, benachbart waren, etwas stärker erleuchtet gewesen wären, als die übrige Fläche der Netzhaut. Dann konnte auch selbst ein gewisser, wenn auch sehr unvollkommener und ungenauer Grad der Localisirung im Sehfelde ausgebildet sein, wie auch J. WARE [1] bei einem ähnlichen Falle bemerkte. Letzterer fand, dass Kinder mit Cataract nicht nur die Farben gefärbter Gegenstände, die man dem Auge nahe brachte, noch erkennen konnten, sondern sogar einigermassen die Entfernung. Ein siebenjähriger Knabe, der von WARE operirt war, war von Anfang an viel geschickter und sicherer als CHESELDEN's Patient. Es ist sehr interessant, dass in dem beschriebenen Falle dennoch das Erlernen der Gesichtswahrnehmungen so deutlich hervortritt.

Noch merkwürdiger in mancher Beziehung ist ein von WARDROP [2] mitgetheilter Fall von einer Dame, welche blind, wahrscheinlich mit getrübten Linsen geboren war. Im Alter von sechs Monaten wurde sie in Paris einer Operation unterworfen, nach welcher das rechte Auge ganz zu Grunde ging, im andern die Pupille vollständig verwuchs, so dass keine Spur derselben mehr zu sehen war, ausser einigen Streifen von gelben Ausschwitzungen, die in unregelmässiger Weise über die Mitte der Iris verbreitet waren. Sie war demnach viel blinder, als Staarkranke zu sein pflegen, und konnte wohl kaum mehr vom Licht und seiner Richtung erkennen, als Gesunde hinter den geschlossenen Augenlidern erkennen können. Sie konnte ein sehr helles von einem dunklen Zimmer unterscheiden, ohne indessen die Richtung des Fensters erkennen zu können, durch welches das Licht drang; dagegen bei Sonnenschein und hellem Mondschein erkannte sie die Richtung, wo das Licht herkam.

Am 26. Januar 1826 wurde versucht, die Ausschwitzungen, die die Pupille verschlossen, zu durchschneiden, was nicht gelang. Am 8. Februar darauf wurde ein Schnitt durch die Iris gemacht, der reichlich Licht in das Auge treten liess; hinter demselben lag aber noch eine undurchsichtige Masse. Während der mässigen Entzündung, welche folgte, war die Patientin gegen Licht sehr empfindlich; man bemerkte, dass sie oft versuchte ihre Hände zu sehen. Am 17. Februar endlich wurde die Oeffnung in der Iris erweitert und die opaken Massen hinter derselben entfernt, wodurch endlich das Sehen frei wurde. Ich lasse hier das Wesentliche von WARDROP's Bericht folgen:

„Nach der Operation kehrte sie in einem Wagen nach Haus zurück, die Augen nur lose mit einem seidenen Tuch verbunden; das erste, was sie bemerkte, war ein Miethwagen, der vorbeikam, wobei sie ausrief: „Was für ein grosses Ding ist da bei uns vorbeigekommen?" Im Lauf des Abends bat sie ihren Bruder, ihr seine Uhr zu zeigen, in Betreff deren sie viel Neugier bewies, und sie blickte nach ihr eine geraume Zeit, indem sie sie nahe an ihr Auge hielt. Man fragte, was sie sähe, und sie antwortete, dass eine Seite dunkel und die andere hell wäre; sie zeigte auch auf die Ziffer 12 und lächelte. Ihr Bruder fragte, ob sie noch etwas mehr sähe? sie antwortete „Ja" und zeigte auf die Ziffer 6 und auf die Zeiger der Uhr. Dann betrachtete sie die Kette und die Siegel, und bemerkte, dass eines der Siegel hell sei, was in der That sich so verhielt, da es aus Bergkrystall war. Am andern Tage bat sie Herr WARDROP wieder nach der Uhr zu sehen, was sie ver-

---

[1] J. WARE *Case of a young gentleman who recovered his sight, when seven years of age. Phil. Trans.* 1801. XCI. p. 382—396.

[2] J. WARDROP *Case of a lady born blind, who received sight at an advanced age by the formation of an artificial pupil. Phil. Trans.* 1826. III. 529—540.

weigerte, indem sie sagte, dass das Licht ihrem Auge wehe thäte und dass sie sich äusserst dumm vorkäme, indem sie damit meinte, sie sei zu sehr verwirrt durch die sichtbare Welt, die ihr so zum ersten Male eröffnet war. Am dritten Tage bemerkte sie Thüren an der andern Seite der Strasse und fragte, ob sie roth seien; sie waren in der That von der Farbe des Eichenholzes. Am Abend blickte sie nach ihres Bruders Gesicht und sagte, sie sähe seine Nase; er forderte sie auf, danach zu greifen, was sie that; dann warf er sich ein Taschentuch über das Gesicht und sagte, sie möchte noch einmal hinsehen, worauf sie es scherzend fortzog und fragte: „Was soll das heissen?"

Am sechsten Tage erklärte sie, dass sie besser sähe, als an irgend einem der vorigen Tage; „aber ich kann nicht sagen, was ich sehe, ich bin ganz dumm". Sie schien in der That dadurch ganz verwirrt zu sein, dass sie nicht fähig war, die Wahrnehmungen durch den Tastsinn mit denen durch den Gesichtssinn zu combiniren, und fühlte sich enttäuscht, dass sie nicht fähig war, sogleich Gegenstände mit dem Auge zu unterscheiden, die sie so leicht durch Betasten unterscheiden konnte.

Am siebenten Tage bemerkte sie die Hauswirthin, bei der sie wohnte, und erklärte, dass sie schlank sei. Sie fragte, was die Farbe ihres Kleides sei? worauf man antwortete, es sei blau. „So ist auch das Ding auf Eurem Kopfe", bemerkte sie, was richtig war; „und Euer Taschentuch ist von anderer Farbe", was auch richtig war. Sie fügte hinzu: „Ich sehe Euch ziemlich gut, denke ich." Theetassen und Untertassen wurden einer Prüfung unterzogen; „Was ist dies?" fragte ihr Bruder. „Ich weiss es nicht", antwortete sie, „es sieht sehr verqueer aus; aber ich kann im Augenblick sagen, was es ist, wenn ich es anfasse." Sie sah eine Orange über dem Kamin liegen, aber hatte keinen Begriff, was es wäre, bis sie sie berührte. Sie schien nun heiterer zu werden und grössere Hoffnungen auf ihren Eintritt in die Welt des Sichtbaren zu hegen; auch meinte sie, dass sie ihre neu erworbenen Fähigkeiten würde besser gebrauchen können, wenn sie nach Haus zurückkäme, wo ihr Alles genau bekannt war.

Am achten Tage fragte sie ihren Bruder bei Tische, was er sich da gerade nähme; und als ihr gesagt wurde, es sei ein Glas mit Portwein, antwortete sie: „Portwein ist dunkel und sieht sehr hässlich aus". Als Kerzen in das Zimmer gebracht wurden, bemerkte sie ihres Bruders Gesicht im Spiegel und auch das einer anwesenden Dame; sie ging auch zum ersten Male ohne Beistand von ihrem Stuhl zu einem Sopha und wieder zurück zu dem Stuhl. Beim Thee fiel ihr das Geschirr auf, sie bemerkte den Glanz des Porzellan und sie fragte: „was die Farbe längs der Kante sei". Man sagte ihr, es sei Gelb, worauf sie erwiderte: „Die Farbe will ich wieder kennen".

Am neunten Tage kam sie zum Frühstück herab in sehr guter Laune; sie sagte zu ihrem Bruder: „Heut sehe ich Dich sehr gut", kam zu ihm heran und reichte ihm die Hand. Sie bemerkte auch einen Miethzettel an dem Fenster eines Hauses auf der entgegengesetzten Seite der Strasse, und ihr Bruder, um sich zu überzeugen, führte sie drei verschiedene Male an das Fenster, und zu seinem Erstaunen und Freude deutete sie jedesmal ganz bestimmt danach hin.

Sie brachte einen grossen Theil des eilften Tages damit zu, aus dem Fenster zu sehen, und sprach sehr wenig.

Am zwölften Tage wurde ihr der Rath gegeben auszugehen, worüber sie sehr vergnügt war. Ihr Bruder ging mit ihr, als ihr Führer, und nahm sie mit sich zweimal um die Säulenhallen von Coventgarden herum. Sie schien sehr erstaunt, aber offenbar erfreut zu sein; der klare blaue Himmel zog ihre Aufmerksamkeit zuerst auf sich, und sie sagte: „Das ist das Hübscheste, was ich bisher gesehen

habe, und immer gleich hübsch, so oft ich mich danach wende und hinsehe". Sie unterschied den Strassendamm vom Trottoir und trat von dem einen zum andern herüber, wie Jemand, der an den Gebrauch seiner Augen gewöhnt ist. Ihre grosse Neugier und die Art, wie sie die Menge von Gegenständen rings herum anstarrte und danach zeigte, erregte die Aufmerksamkeit der Vorübergehenden und ihr Bruder brachte sie bald nach Hause, sehr gegen ihren Willen.

Am dreizehnten Tage trug sich nichts Besonderes zu bis zur Theezeit, wo sie bemerkte, dass anderes Theegeschirr aufgesetzt war, welches nicht hübsch sei und einen dunkeln Rand habe, was eine richtige Angabe war. Ihr Bruder forderte sie auf, in den Spiegel zu sehen und ihm zu sagen, ob sie sein Gesicht darin sähe; worauf sie, sichtbar enttäuscht, antwortete: „Ich sehe mein eignes; lass mich gehen".

Am vierzehnten Tage fuhr sie in einem Wagen vier Meilen weit auf der Wandsworth-Strasse, bewunderte meistens den Himmel und die Felder, bemerkte die Bäume und auch die Themse, als sie über Vauxhallbrücke kam. Es war heller Sonnenschein und sie sagte, dass etwas sie blende, wenn sie auf das Wasser sähe.

Am fünfzehnten Tage, einem Sonntage, ging sie nach einer Kapelle in einiger Entfernung; sie sah jetzt entschieden deutlicher als früher, aber erschien noch verwirrter als während der Zeit, wo ihr Gesicht weniger vollkommen war. Die Leute, welche auf dem Trottoir vorbeikamen, erschreckten sie; und einmal als ein Herr an ihr vorbeikam, der eine weisse Weste und einen blauen Rock mit gelben Knöpfen hatte, die im Sonnenschein stark erglänzten, schreckte sie so zusammen, dass sie ihren Bruder, der mit ihr ging, von dem Trottoir herabzog. Sie erkannte, dass der Geistliche seine Hände auf der Kanzel bewegte und dass er etwas darin hielt; es war ein weisses Taschentuch

Am sechszehnten Tage fuhr sie aus, um eine Visite in einem entfernten Theile der Stadt zu machen; das Getreibe in den Strassen schien sie sehr zu unterhalten. Als sie gefragt wurde, wie sie an diesem Tage sähe, antwortete sie: „Ich sehe sehr viel, wenn ich nur sagen könnte, was ich sehe; aber sicherlich, ich bin sehr dumm".

Nichts Besonderes fiel am siebenzehnten Tage vor; und als ihr Bruder sie fragte, wie es ihr ginge, antwortete sie: „Es geht mir gut, und ich sehe immer besser; aber quält mich nicht mit vielen Fragen, bis ich etwas besser gelernt habe, meine Augen zu gebrauchen. Alles, was ich sagen kann, ist, dass ich versichert bin durch alles Das, was ich sehe, welch' eine grosse Veränderung mit mir vorgegangen ist; aber ich kann nicht beschreiben, was ich empfinde."

Achtzehn Tage nach der Operation versuchte Herr Wardrop durch einige Proben die Genauigkeit ihrer Begriffe von der Farbe, Gestalt, Form, Lage, Bewegung, Entfernung der äusseren Objecte festzustellen. Da sie nur mit einem Auge sehen konnte, konnte nichts ermittelt werden über das Doppeltsehen mit zwei Augen. Sie erkannte offenbar die Verschiedenheit der Farben, das heisst, sie erhielt und empfand verschiedene Eindrücke von verschiedenen Farben. Als ihr verschiedenfarbige Stücke Papier, $1\frac{1}{2}$ Zoll im Quadrat, vorgelegt wurden, unterschied sie sie nicht nur sogleich von einander, sondern gab einigen Farben auch einen entschiedenen Vorzug; Gelb gefiel ihr am besten, und dann Rosaroth. Hierbei mag noch bemerkt werden, dass wenn sie einen Gegenstand zu prüfen wünschte, es ihr ziemlich schwer wurde, ihr Auge dahin zu richten und seine Lage ausfindig zu machen, indem sie ihre Hand sowohl, wie ihr Auge in verschiedenen Richtungen herum bewegte, wie Jemand mit verbundenen Augen oder im Dunkeln mit seinen Händen umhergreift, um zu fassen, was er wünscht. Sie unterschied auch grosse von kleinen Gegenständen, wenn beide ihr neben einander zum Vergleich vorge-

halten wurden. Sie sagte, sie sähe verschiedene Formen an verschiedenen Gegenständen, die ihr gezeigt wurden. Man fragte, was sie meinte unter verschiedenen Formen, zum Beispiel langen, runden, viereckigen, und nachdem man sie gebeten hatte, mit ihrem Finger diese Formen auf ihrer anderen Hand zu zeichnen, brachte man vor ihr Auge die betreffenden Formen, wobei sie richtig nach ihnen hinwies. Sie unterschied nicht nur kleine von grossen Gegenständen, sondern wusste auch, was oben und unten sei. Um dies zu prüfen, wurde eine mit Tinte gezeichnete Figur vor ihr Auge gebracht, deren eines Ende breit, das andere schmal war; sie sah deren Lage, wie sie wirklich war, nicht umgekehrt. Sie konnte auch Bewegungen bemerken; denn als ein Glas Wasser auf den Tisch vor sie gestellt wurde und als sie ihre Hand näherte, schnell fortgezogen wurde in grössere Entfernung, sagte sie sogleich: „Sie bewegen es; Sie nehmen es fort“.

Sie schien dagegen die grösste Schwierigkeit zu haben in der Schätzung der Entfernung der Dinge; denn während ein Gegenstand dicht vor ihr Auge gehalten wurde, suchte sie wohl danach mit ausgestreckter Hand weit jenseits seiner wirklichen Lage, während sie bei anderen Gelegenheiten nahe an ihrem Gesicht herumgriff nach einem Dinge, was weit entfernt war.

Sie lernte mit Leichtigkeit die Namen der verschiedenen Farben, und zwei Tage, nachdem ihr die farbigen Papiere gezeigt waren, bemerkte sie beim Eintritt in ein carminrothes Zimmer, dass es roth sei. Sie bemerkte auch einige Gemälde, die an der rothen Wand des Zimmers hingen, in dem sie sass, wobei sie einige kleine Figuren auf ihnen unterschied, aber nicht wusste, was sie darstellten, und die vergoldeten Rahmen bewunderte.

Dabei mag noch bemerkt werden, dass sie durch die Uebung ihres Gesichts nur sehr wenig Kenntniss irgend welcher Formen gewonnen hatte und unfähig war, die Wahrnehmungen des neu gewonnenen Sinnes anzuwenden und zu vergleichen mit dem, was sie durch den Tastsinn zu erkennen gewöhnt war. Als man daher den Versuch machte, ihr einen silbernen Bleistifthalter und einen grossen Schlüssel in die Hand zu geben, so unterschied sie und kannte beide ganz genau. Aber wenn sie neben einander auf den Tisch gelegt wurden, sah sie, dass beide verschieden seien, aber sie konnte nicht sagen, welches der Bleistifthalter sei und welches der Schlüssel.

Nichts weiter kam vor in der Geschichte dieser Dame, was der Erwähnung werth wäre, bis zum fünfundzwanzigsten Tage nach der Operation. An dem Tage fuhr sie in einem Wagen durch Regent's Park, und schien dort mehr als gewöhnlich sich zu unterhalten, und stellte mehr Fragen über die umgebenden Gegenstände, zum Beispiel: „Was ist das?“ Es ist ein Soldat, war die Antwort. „Und das, sieh! sieh!“ Es waren Kerzen von verschiedenen Farben in einem Ladenfenster. „Was ist das, das da vorbeikam?“ Es war ein Herr zu Pferde. „Aber was ist da Rothes auf dem Trottoir?“ Es waren ein Paar Damen, die rothe Shawls trugen. Als sie in den Park kam, wurde sie gefragt, was sie vorzugsweise sähe, oder ob sie errathen könnte, was einzelne von den Gegenständen wären. „O ja“, antwortete sie, „da ist der Himmel, da ist Gras, dort ist Wasser und zwei weisse Dinge“, welches zwei Schwäne waren. Als sie auf dem Rückweg durch Piccadilly kam, erstaunte sie sehr über die Juwelierläden und ihre Aeusserungen erregten herzliches Lachen bei ihren Begleitern.

Von da bis zu der Zeit, wo sie London verliess, am 31. März, sechs Wochen nach der Operation, fuhr sie fort, fast täglich mehr Kenntniss der sichtbaren Welt zu gewinnen, aber es blieb noch viel zu lernen übrig. Sie hatte eine ziemlich genaue Kenntniss der Farben und ihrer verschiedenen Abstufungen und Namen gewonnen; und als sie Herrn Wardrop ihren Abschiedsbesuch machte, trug sie

das erste Kleid, was sie sich selbst ausgewählt hatte, helles Purpurroth, was ihr sehr zu gefallen schien, ebenso wie ihr Hut, der mit rothen Bändern geziert war. Sie hatte noch durchaus keine genaue Kenntniss der Entfernungen oder Formen gewonnen, und bis zu dieser Zeit hin war sie immer noch verwirrt bei jedem (neuen) Gegenstand, auf den sie blickte. Auch war sie noch nicht fähig, ohne beträchtliche Schwierigkeit und zahllose vergebliche Versuche, ihr Auge auf einen Gegenstand zu richten, so dass, wenn sie versuchte danach hinzublicken, sie ihren Kopf nach verschiedenen Seiten wendete, bis ihr Auge den Gegenstand erfasste, nach dem sie suchte. Sie hegte indessen noch immer die Hoffnung, die sie kurz nach der Operation geäussert hatte, dass wenn sie nach Hause käme, ihre Kenntniss der Aussendinge genauer und verständlicher werden würde, und dass, wenn sie blicken könnte auf die Sachen, mit denen ihr Tastsinn so lange vertraut gewesen war, die Verwirrung, welche die Mannigfaltigkeit der Gegenstände ihr bis jetzt verursacht hatte, schwinden würde.

So weit Wardrop. Es ist bei diesem Berichte zu bedenken, dass Patientin vor der letzten Operation schon mehrere Tage lang sich bemüht hat, bei freilich noch nicht vollständig wiedererlangtem Gesichtsvermögen, ihre Hände zu besehen, und daher wohl gelernt haben konnte, diese im Gesichtsfelde zu kennen und ihren Bewegungen mit dem Blicke zu folgen, wie sie denn auch selbst vorher schon gelernt haben konnte, ihre Augen der Sonne zuzuwenden, also einen gewissen Grad der Richtung des Blicks und die Kenntniss der ohngefähren Richtung, aus der das ihre Augen erregende Licht herkam, erhalten haben mochte. Die optischen Bilder in ihrem Auge müssen ziemlich gut gewesen sein, da sie die Ziffern und Zeiger einer Taschenuhr, einen Miethszettel an einem gegenüberliegenden Fenster, Wachskerzen, Juwelenschmuck am Schaufenster von der Mitte der Strasse her aus dem Wagen erkennen konnte. Das Erste, was sie als Gegenstände unterscheiden lernte, waren bewegliche Dinge, namentlich menschliche Gestalten und durch Farbe hervorstechende Objecte, wie die röthlichen Thüren, die Orange, die farbigen Kleider der Frauen. Es ist übrigens auch bei den neugeborenen Kindern auffallend, wie viel früher sie menschliche Gestalten und Gesichter zu erkennen und mit dem Blicke zu verfolgen wissen, als andere Gegenstände. Die menschlichen Gestalten ziehen natürlich vor anderen Dingen das Interesse auf sich und sind durch die Art der Bewegungen, die sie ausführen, von andern Objecten des Gesichtsfeldes wesentlich unterschieden. Bei diesen Bewegungen sind sie auch als zusammenhängendes Ganzes charakterisirt, und das Gesicht, als ein weissröthlicher Fleck mit den beiden glänzenden Augen ist immerhin eine Stelle dieses Bildes, welche leicht wiederzuerkennen sein wird, auch für Jemanden, der sie erst wenige Male gesehen hat.

Was die Unterscheidung der Formen betrifft, auf die es uns hier hauptsächlich ankommen würde, so ist zunächst klar, dass in einem solchen Falle die Hauptschwierigkeit sein muss, die wechselnden perspectivischen Projectionen körperlicher Gegenstände kennen zu lernen. Denn der Blinde weiss natürlich gar nichts von der Möglichkeit einer solchen Projection. Aber einzelne Züge in dem Bericht zeigen, dass die Dame auch solche Formen, die durch perspectivische Projection nicht entstellt waren, nicht zu erkennen wusste, wie zum Beispiel den Schlüssel und den Bleistifthalter. Ersterer mit Bart und Ring, von der Fläche gesehen, musste auf der Netzhaut sich in derselben Gestalt darstellen, wie man ihn fühlt. Wenn also ein angeborenes Vermögen da wäre, die Formen der Netzhautbilder zu erkennen, im Sinne der nativistischen Theorie, so hätte der Schlüssel am Ringe und Barte erkannt werden müssen. Dazu kommt die mehrfach erwähnte Unfähigkeit, den Ort eines indirect gesehenen Objectes mit dem Blicke und der Hand zu finden. Wären die Richtungen der Verbindungslinien zwischen dem centralen und einem

seitlichen Bilde der Netzhaut schon durch angeborene Anschauung bekannt, so könnte es keine grosse Schwierigkeit gemacht haben, den Blick längs der Verbindungslinie, der Reihe der auf dieser liegenden Bilder folgend, nach dem gewünschten Punkte hinzuführen.

Es scheint mir dagegen nicht zu streiten, dass dieselbe Dame am achtzehnten Tage nach der Operation einfache Formen zu unterscheiden wusste. Wenn man den Blick längs des Umfanges eines Kreises, eines länglichen Rechtecks, eines Quadrates laufen lässt, wird man unter ähnlichen Umständen wohl bald fähig sein, ein geradliniges Begrenzungsstück von einem krummlinigen zu unterscheiden, eine Ecke als solche zu erkennen, zu wissen, ob man den Blick hauptsächlich von oben nach unten, oder von rechts nach links laufen lässt, u. s. w.; was zur Erkennung der genannten Figuren genügen würde. Es ist hierbei nur nöthig, den Blick längs einer continuirlich fortlaufenden Umfangslinie fortzuführen, was natürlich leichter ist, als ihn nach einem entfernten Object im Seitentheil des Gesichtsfeldes hinzuleiten. Auch das Erkennen der Nase, als eines Vorsprunges an dem röthlichen Fleck, den das Gesicht ihres Bruders im Gesichtsfeld bildete, lässt sich auf diese Weise erklären. Die Uhr, die sie am ersten Abend untersuchte, hatte sie in der Hand und erkannte sie also durch das Getast; die Ziffern und Zeiger hat sie nicht als solche bezeichnet, sondern nur bemerkt, dass sie markirte Stellen für das Gesicht seien, während der tastende Finger durch das Uhrglas hindurch nichts davon erkennen konnte. Diese Theile zu zeigen, war ihr möglich, indem sie das Bild ihres Fingers, was sie schon kannte, bis zu dem Bilde der genannten dunklen Objecte heranbewegte.

Andererseits scheint mir die Geschwindigkeit, mit der die Patientin einige Dinge sehen lernte, doch zu gross gewesen zu sein, um zu der Annahme zu stimmen, die Localzeichen der Netzhautpunkte seien discontinuirliche und ungeordnete Zeichen, für welche erst aus Erfahrung gelernt werden müsste, welche Localzeichen benachbarten Netzhautpunkten angehören. Wenn die Localzeichen aber selbst continuirlich über das Feld der Netzhaut veränderliche Grössen sind, so würden von vorn herein, ohne Erfahrung, benachbarte Netzhautpunkte in der Empfindung als benachbart charakterisirt sein. Nur im letzteren Fall kann der Eindruck eines beleuchteten Flächenstücks der Netzhaut gleich als Beleuchtung einer zusammenhängenden Fläche im Sehfelde aufgefasst werden, ohne dass vorausgehende Erfahrung lehrt, dass die Localzeichen der erregten Netzhautfasern zusammenliegenden Faserenden und nicht punktförmig im Felde verstreuten angehören [1].

Geschichte. Die Frage, ob die Kenntniss der Ausmessungen des Gesichtsfeldes angeboren sei oder erworben, wurde von den Sensualisten des vorigen Jahrhunderts eifrig discutirt. Molyneux warf die Frage auf, ob ein Blindgeborener, der durch das Gefühl einen Würfel von einer Kugel zu unterscheiden gelernt hätte, sie auch sogleich durch das Gesicht unterscheiden würde, wenn er dieses erlangte. Molyneux und Locke [2] antworteten beide mit Nein. Jurin [3] schloss sich dem an, bemerkte nur dabei, dass, wenn der Blindgeborene Würfel und Kugel von verschiedenen Richtungen betrachten dürfte, die letztere ihm immer dieselben, ersterer verschiedene Bilder geben und er sie daran zu unterscheiden vermögen würde. Diese Ansicht, wonach alle Kenntniss der Form in den Gesichtswahrnehmungen

[1] Andere Fälle: Grant in Voigt's Magaz. IV. 1. S. 21. Hofbauer Beiträge II. 2. S. 249. Ware *Phil. Trans.* 1801, p. 332. Home *Phil. Trans.* 1807, I. p. 83. *Bibl. Britann.* XXXVII. p. 85. Jahr 1808. Trinchinetti in *Arch. des sc. phys. et nat. de Genève*, VI. 336. *Giorn. d. ist. Lomb. 1847*, fasc. 46 e 47.

[2] *Essay concerning human understanding.* B. II. Ch. 9, §. 8. Siehe auch Berkeley *New Theory of vision 1709*. Section 79.

[3] Smith *Opticks. Remarks*, p. 27. Ebenso Priestley Geschichte der Optik. II. 512 der deutschen Uebersetzung.

auf Erfahrung und Vergleichung mit dem Tastsinn beruhe, blieb während des vorigen Jahrhunderts wohl die herrschende, so weit man überhaupt dieser Frage Aufmerksamkeit zuwandte, bis unter dem Einfluss der KANT'schen Lehre, dass der Raum eine angeborene Form unserer Anschauung sei, JOHANNES MÜLLER [1] die entgegengesetzte Ansicht aufstellte. Nach ihm beruht Fühlen und Sehen auf denselben Grundanschauungen von der Ausbreitung unserer eigenen Organe im Raume. Er geht also aus von der Annahme, dass wir eine angeborene Kenntniss der räumlichen Dimensionen der empfindenden Theile der Netzhaut und ihrer Anordnung von vornherein mitbringen, und dass dadurch die ursprünglichen Ausmessungen des gesehenen flächenhaften Bildes unmittelbar in der Empfindung gegeben sind. Nur das nach aussen Sehen, die Beurtheilung der Entfernung, der Körperform der Objecte sind ihm durch Erfahrung gegeben. Nach aussen sehen, heisst nach J. MÜLLER die Gegenstände als ausserhalb unseres Körpers anschauen. Nun sehen wir fortdauernd oder immer wiederkehrend Theile unseres Körpers auf dem Felde unserer Netzhaut abgebildet, und erkennen sie als uns zugehörig, durch unsern Willen unmittelbar beweglich an. Das Andere, was wir sehen, wechselt, und wir sehen es also als nicht zugehörig oder äusserlich unserem Körper. Dann lernen wir später die zwei Localisationen durch den Tastsinn der Haut und durch das Sehen mit der Netzhaut in der Vorstellung vereinigen. Doch erkennt J. MÜLLER an, dass dies wunderbar scheinen müsse, nämlich vom Standpunkte seiner Theorie aus; er vergleicht es mit den Wahrnehmungen, welche durch gleichzeitige Wirkung des Tastgefühls und durch Betrachten eines Spiegelbildes unseres Körpers (z. B. beim Rasiren) zu Stande kommen können. Was das Problem des Aufrechtsehens trotz der umgekehrten Lage der Netzhautbilder betrifft, so erscheint uns nach MÜLLER wirklich alles verkehrt, und nur weil unser eigener Körper und die durch den Tastsinn an ihm markirten Stellen uns alle auch verkehrt erscheinen, tritt kein Widerspruch ein. Eigentlich werden also nach dieser Ansicht nicht die Bilder in den äussern Raum durch unser Vorstellen projicirt, sondern der Anschauungsraum ist ein innerer, in den die anderweitigen Wahrnehmungen der Dinge hineingetragen werden. Consequenter noch hat UEBERWEG [2] diese Seite der MÜLLER'schen Theorie dargestellt, während HERING [3] diesen Anschauungsraum zu einem Raum von drei Dimensionen macht und eigenthümliche Hypothesen hinzugefügt hat, um die dritte Dimension desselben durch die Anschauung entstehen zu lassen, von denen erst in den folgenden Abschnitten die Rede sein kann. Der Letztgenannte hält auch in dem Abschnitt über einäugige Stereoskopie durchaus die Ansicht fest, dass die Netzhaut sich so vollständig in ihrer Räumlichkeit anschaue, dass sogar die Distanzen der Punkte auf ihr nach der geradlinigen Sehne, statt nach dem Bogen geschätzt werden, eine Ansicht, deren Unbrauchbarkeit zur Erklärung der Gesichtstäuschungen, die sie erklären soll, wir schon oben berührt haben, und die in directem Widerspruche zu stehen scheint mit der in §. 118 und 124 desselben Werks gemachten Annahme, wonach eine Ebene der scheinbare Ort der von beiden Netzhäuten übereinstimmend und identisch gesehenen Punkte sein soll.

Eine unmittelbare Kenntniss der Distanzen auf der Netzhaut als Grund der Vertheilung der gesehenen Punkte im Sehfeld liegt auch denjenigen Ansichten zu Grunde, welche eine unmittelbar angeborene Projection der Bilder in Richtung bestimmter Linien nach aussen annahmen. PORTERFIELD [4] und BARTELS [5] liessen

[1] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig 1826. — Handbuch der Physiologie des Menschen. Coblenz 1840. Bd. II. S. 362.
[2] Zeitschrift für rationelle Medicin. R. 3, Bd. V, S. 268—282.
[3] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1864.
[4] *On the eye.* II. 285.
[5] Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. Berlin 1834.

diese Projection nach den Normalen der Netzhäute geschehen, VOLKMANN[1] nach den Richtungslinien, das heisst den Linien, die durch die hintern Knotenpunkte gehen. In beiden Ansichten ist also wenigstens die Schätzung der Winkeldistanzen im Sehfelde durch angeborene Momente gegeben; ähnlich TOURTUAL[2]. VOLKMANN hat dann später seine Ansicht noch näher dahin specificirt, dass er glaubt, die scheinbare Grösse der Gesichtswinkel im Sehfelde hinge ab von der Zahl der einzelnen empfindlichen Nervenelemente, welche auf der entsprechenden Strecke der Netzhaut lägen[3]. Die Ansicht von VOLKMANN liegt sehr vielen neueren Arbeiten über Physiologie des Auges zu Grunde; so benutzt sie unter andern namentlich auch RECKLINGHAUSEN[4], um die Erklärung für die Abweichung des scheinbar verticalen Meridians und andere optische Täuschungen zu geben, indem er die Möglichkeit entsprechender Verziehungen des Netzhautbildes nachzuweisen sucht.

Die Rückkehr der Physiologen zu der älteren entgegenstehenden Ansicht, wonach alle Beurtheilung des Räumlichen auf Erfahrungen beruhe, findet ihr Vorspiel auf philosophischer Seite in den Ansichten von HERBART über die Sinneswahrnehmungen. Es war sein metaphysisches Princip von der Einheit der Seele, welches ihn veranlasste, alle Vorstellungen für qualitative und zeitlich einander folgende, nicht neben einander bestehende Processe zu erklären. Daher musste er alle Raumanschauung von der Bewegung herleiten und die localen Unterschiede der Empfindung mussten qualitative sein. LOTZE war es namentlich, der diese Ansichten auf die factischen Verhältnisse bei den sinnlichen Wahrnehmungen zu übertragen suchte, und an den sich physiologischerseits zunächst MEISSNER[5] und CZERMAK[6] in ihren Untersuchungen über den Tastsinn anschlossen. In der physiologischen Optik wurde die Aufmerksamkeit zunächst durch das Studium der Bewegungen des Auges wieder in diese Richtung gelenkt. Einer der ersten Schritte war die von BRÜCKE aufgestellte und in den folgenden Abschnitten zu besprechende Ansicht über den Einfluss der Bewegungen beim stereoskopischen Sehen. Ich selbst habe in einem populären Vortrage[7] die Sache von dieser Seite dargestellt. W. WUNDT[8] hat das Verdienst, den ersten vollständigeren Versuch gemacht zu haben, die Bildung des Sehfeldes aus den Bewegungserfahrungen herzuleiten, eine Aufgabe, deren Existenz und Wichtigkeit so gut wie ganz vergessen war. Er betrachtet darin als Localzeichen die qualitativen Veränderungen der Empfindung auf verschiedenen Stellen der Netzhaut, die von PURKINJE, AUBERT und SCHELSKE beobachtet waren und oben S. 300—301 erwähnt wurden. Ich habe diese Annahme in der oben gegebenen Darstellung nicht benutzt, weil ich nicht sehe, wie der Eindruck zum Beispiel von Schwarz in der Mitte des Feldes von Roth auf dem Randtheil local unterschieden werden kann, wenn kein anderes Erkennungszeichen für den localen Unterschied da ist, als der qualitative Unterschied, wonach Roth in der Mitte roth, am Rande des Sehfeldes schwarz erscheint. Die Beurtheilung der Distanzen im Sehfelde leitet WUNDT ab von dem Gefühl der Muskelanstrengung, welche nöthig sei, um sie mit dem Blicke zu durchlaufen. Da die Erfahrung lehrt, dass das Urtheil über die

---

[1] Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig 1836.
[2] Die Sinne des Menschen. Münster 1827.
[3] Berichte der Kön. Sächs. Ges. der Wissenschaften. 30. April 1853.
[4] Archiv für Ophthalmologie. V. 2, S. 127. — POGGENDORFF's Annalen, CX. 65—92.
[5] Beiträge zur Anatomie und Physiologie der Haut. Leipzig 1852. — Zeitschrift für rationelle Medicin. R. 2. Bd. IV, S. 260.
[6] Sitzungsberichte der K. K. Akademie der Wiss. zu Wien 1855. XV. 466 u. XVII. 577. — MOLESCHOTT's Untersuchungen zur Naturlehre des Menschen. I. 183.
[7] Ueber das Sehen des Menschen. Leipzig 1855.
[8] Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig u. Heidelberg 1862. Abdrücke aus Zeitschr. für rat. Medicin 1858—1862.

Muskelanstrengungen einige Sicherheit nur hat, wenn fortdauernd die Wirkungen derselben mit den Gesichtsbildern verglichen werden, so bin ich von den möglichen Erfahrungen über die Congruenz gleicher Strecken von correspondirender Richtung ausgegangen, welche Annahme, wie mir scheint, wesentlich bestätigt wird durch die Erfahrung, dass Strecken von übereinstimmender Richtung genau und sicher verglichen werden, solche von nicht übereinstimmender Richtung nicht. Dadurch wird freilich nicht ausgeschlossen, dass nicht auch das von WUNDT in Anspruch genommene Gefühl der Muskelanstrengung mitbenutzt werde.

Die Untersuchungen über die Genauigkeit des Augenmaasses wurden zunächst veranlasst durch E. H. WEBER's [1] Gesetz, welches später von FECHNER [2] als psychophysisches Gesetz bezeichnet worden ist und wonach die kleinsten empfindbaren Unterschiede proportional der ganzen empfundenen Grösse sind. Ausser den beiden Genannten hat namentlich auch VOLKMANN [3] eine grosse Reihe sorgfältiger Messungen angestellt. Den Einfluss der Zeit, welche zwischen zwei solchen Vergleichungen verstreicht, hat F. HEGELMAYER [4] untersucht.

Den constanten Fehler in der Vergleichung horizontaler und verticaler Distanzen hat A. FICK zuerst bemerkt [5], die constante Abweichung des scheinbar verticalen Meridians RECKLINGHAUSEN [6], letzterer auch die scheinbare Krümmung der geraden Linie in den peripherischen Theilen des Sehfeldes, die Gesichtstäuschungen an Linienmustern ZOELLNER [7], dessen Entdeckung dann von HERING [8], A. KUNDT [9] und AUBERT [10] weiter verfolgt wurde.

Die ältere Geschichte und Literatur der Untersuchungen über den blinden Fleck, wobei es sich hauptsächlich um den Nachweis der Thatsache und um die physiologische Erklärung der Blindheit handelt, ist auf S. 222—224 gegeben. Die Untersuchungen über die Art der Ausfüllung der Lücke in der Vorstellung beginnen mit E. H. WEBER's [11] Untersuchungen, denen sich A. FICK und P. DU BOIS REYMOND [12] und VOLKMANN [13] anschlossen, die fast ausschliesslich richtige Localisation der rings um den Fleck gesehenen Objecte beobachteten und die Ausfüllung der Lücke psychologisch erklärten. Dagegen trat WITTICH [14] auf mit der Beobachtung falscher Localisationen, während FUNCKE [15] auf die Möglichkeit und das Vorkommen von individuellen Unterschieden in dieser Beziehung aufmerksam machte.

1709. BERKELEY *New Theory of vision.* Section 79.
— LOCKE *Essay concerning human understanding.* B. II. Ch. 9. §. 8.
1738. SMITH *Opticks. Remarks.* p. 27.

---

[1] Ueber den Tastsinn und das Gemeingefühl, S. 559 in WAGNER's physiologischem Wörterbuch. — Programmata collecta, Fasc. III. 1851. — Berichte der sächs. Societät 1852, S. 85 ff.

[2] Elemente der Psychophysik. Leipzig 1860. Bd. I, S. 211—236.

[3] Berichte der Sächsischen Soc. 1858, p. 140. — Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig 1863. Heft I, S. 117—139.

[4] VIERORDT's Archiv XI, S. 844—853.

[5] De errore quodam optico asymmetria bulbi effecto. Marburg 1851. Auszug in Zeitschrift für rationelle Medicin. R. 2. Bd. II, S. 83.

[6] In den oben citirten Aufsätzen.

[7] Poggendorff's Annalen CX, S. 500—523.

[8] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1861. Heft I, S. 65—80.

[9] Poggendorff's Annalen CXX, S. 118.

[10] Physiologie der Netzhaut. Breslau 1865. S. 269—271.

[11] Ueber den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge. Verh. der Sächsischen Ges. 1852. S. 138.

[12] MÜLLER's Archiv für Anat. 1853. S. 396.

[13] Berichte der Königl. Sächs. Ges. 30. April 1853. S. 40.

[14] Archiv für Ophthalmologie. IX. 3. 1863. S. 1—31.

[15] Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br. Bd. III, Heft 3, S. 12 u. 13.

1759. Porterfield *On the eye.* II, 285.
1772. Priestley Geschichte der Optik. II, 512 der deutschen Uebersetzung.
1801. J. Ware *Case of a young gentleman who recovered his sight. Phil. Trans.* 1801. XCI, p. 382—396
1811. Steinbuch Beiträge zur Physiologie der Sinne.
1826. J. Müller Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig. 1.
— J. Wardrop *Case of a lady, born blind. Phil. Trans.* 1826. III, 529—540.
1827. Tourtual Die Sinne des Menschen. Münster.
1834. Bartels Beiträge zur Physiologie des Gesichtsinns. Berlin.
1836. Volkmann Beiträge zur Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig.
1840. J. Müller Handbuch der Physiologie des Menschen. Coblenz. Bd. II, S. 362.
1847. Trinchinetti *Observations sur les premières impressions visuelles, aperçues par deux aveugles de naissance après l'opération de la cataracte. Arch. d. sciences phys. et natur.* VI. 336; *Giornale dell' istituto Lombardo 1847*, fasc. 46 e 47.
1849. Waller *sur un cas, où la vue altérée faisait voir les objets plus petits que nature. Institut.* XVII. No. 787, p. 39.
1851. E. H. Weber Programmata collecta. Fasc. III. — Ueber den Tastsinn und das Gemeingefühl S. 559 in R. Wagner's Wörterbuch der Physiologie.
— Fick de errore quodam optico assymmetria bulbi effecto. Marburg. Auszug in Zeitschr. für ration. Medicin. 2. Bd. II, S. 83.
1852. E. H. Weber über den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge. Berichte der sächsischen Societät. S. 85 ff.
1853. Derselbe über Grösse, Lage und Gestalt des sogenannten blinden Flecks im Auge und die davon abhängigen Erscheinungen. Berichte der sächs. Soc. 1853, S. 149—158; Fechner Centralblatt 1853, S. 929—941.
— A. Fick und P. du Bois Reymond über die unempfindliche Stelle der Netzhaut im menschlichen Auge. Müller's Archiv für Anat. und Physiol. 1853, S. 396—407; Fechner Centralblatt, 1854, S. 57—72.
— A. W. Volkmann über einige Gesichtsphänomene, welche mit dem Vorhandensein eines unempfindlichen Fleckes im Auge zusammenhängen. Berichte der sächs. Soc. 1853, S. 27—50. Fechner Centralblatt 1854, S. 57—72.
1854. J. Czermak über die unempfindliche Stelle der Retina im menschlichen Auge. Wiener Ber. XII, 358—364.
1855. J. J. Oppel über geometrisch-optische Täuschungen. Jahresber. d. Frankfurter Vereins, 1854—55, S. 37—47.
— H. Aubert über den blinden Fleck. Jahresber d. schles. Ges. 1854, S. 25—28.
— Budge Beobachtungen über die blinde Stelle der Netzhaut. Verhandl. des naturhist. Vereins der Rheinlande, 1855, S. XLI.
1856. Aubert und Förster über den Raumsinn der Netzhaut. Jahresber. d. schlesischen Ges. 1856, S. 33—34.
1858. A. W. Volkmann über den Einfluss der Uebung auf das Erkennen räumlicher Distanzen. Leipziger Ber. X. 38—69.
— Derselbe, über das Vermögen, Grössenverhältnisse zu schätzen. Leipziger Ber. X. 173—204.
— G. T. Fechner über ein psychophysisches Grundgesetz. Abhandl. d. Leipziger Ges. VI. 457—532.
— J. J. Oppel Nachlese zu den geometrisch-optischen Täuschungen. Jahresber. d. Frankf. Vereins, 1856—57, S. 47—55, und 1860—61, S. 26—37.
— Ueberweg Zur Theorie der Richtung des Sehens. Zeitschr. für ration. Medicin. 3. Bd. V. S. 268—282.
1859. F. v. Recklinghausen Netzhautfunctionen. Archiv für Ophthalmologie, V. 2, S. 127—179. Poggend. Ann. CX, 65—92.
— Hegelmayer über Sinnengedächtniss. Vierordt's Archiv. XI, S 844—853.
1860. F. Zöllner über eine neue Art von Pseudoskopie. Poggend. Ann. CX, 500—525. *Cosmos* XVIII. 289—290; Zeitschr. für Naturw. XVI. 60—63.
1861. E. Hering Beiträge zur Physiologie. Leipzig. Heft 1, S. 65—80.
— E. Mach über das Sehen von Lagen und Winkeln durch die Bewegung des Auges. Wien. Ber. XLIII. 2. S. 215—224.
— F. Zöllner über die Abhängigkeit der pseudoskopischen Ablenkung paralleler Linien von dem Neigungswinkel der sie durchschneidenden Querlinien. Poggend. Ann. CXIV, 587—591.

1861. E. BACALOGLO über die von Herrn ZÖLLNER beschriebene Pseudoskopie. Poggend. Ann. CXIII, 333—336; Zeitschr. für Naturw. XVIII, 445.
1862. WUNDT Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmungen. Leipzig u. Heidelberg 1862. Abdruck aus der Zeitschr. für ration. Medicin 1858—1862.
1863. A. W. VOLKMANN Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig 1863. Heft I, 139—180.
1864. v. WITTICH Studien über den blinden Fleck. Archiv für Ophthalmologie, IX, 3, S. 9—46.
— O. FUNKE zur Lehre vom blinden Fleck. Berichte der naturf. Ges. zu Freiburg im Breisgau. Bd. III. Heft 3.
1865. AUBERT Physiologie der Netzhaut. Breslau 1865. S. 269—271.

§. 29. Die Richtung des Sehens.

Die bisherigen Thatsachen bezogen sich nur auf die relative Lage der verschiedenen leuchtenden Punkte neben einander im Gesichtsfeld. Wir müssen nun noch über die Beurtheilung ihrer absoluten Richtung sprechen. Dabei ist zunächst zweierlei zu unterscheiden. Im Allgemeinen ist die Richtung einer Linie gegeben durch zwei Winkel, die sie mit den Richtungen passend gewählter fester Axen oder Ebenen bildet, ohne dass wir dabei festsetzen, dass die Linie durch einen bestimmten Punkt gehen solle. Wir schreiben allen mit jener ersten Linie parallelen Linien die gleiche Richtung zu. So haben zum Beispiel alle Magnetnadeln, die innerhalb einer Stadt aufgehängt sind, die gleiche Richtung von Süden nach Norden. Etwas Anderes ist es, wenn wir die Richtung nicht nur im Allgemeinen gegen ein bestimmtes Coordinatsystem, wie es im Gebiete einer Stadt etwa die Lothlinie, die Niveauebene und in dieser der terrestrische Meridian darstellen, geben, sondern wenn wir die Richtungen alle auf einen bestimmten Mittelpunkt beziehen wollen. Dann sind die Richtungen darzustellen durch ganz bestimmte gerade Linien, die durch den gewählten Mittelpunkt hindurchgehen, und deren Richtung ausserdem durch zwei Winkel zu bestimmen ist, die sie mit passend gewählten festen Axen machen. In diesem Falle kann die Richtung nicht bezeichnet werden durch eine andere parallele Linie, die die gleiche Richtung hat, sondern sie muss dieselbe oder identische Richtung haben, das heisst, wenn hinreichend verlängert, mit der ersten Linie vollständig zusammenfallen.

So lange man nur von Gleichheit der Richtungen spricht, sind also nur Winkel zu bestimmen, welche die Richtung definiren; wenn man von Identität der Richtungen spricht, ist auch der Punkt zu bestimmen, welcher als Mittelpunkt gelten soll. Wir können sagen, dass wir im ersteren Falle nur die Richtung bestimmen, im letzteren Falle eine bestimmte Richtungslinie.

Wenn wir nun von den Richtungen des Sehens sprechen, so beziehen wir diese allerdings auf einen Mittelpunkt, nämlich auf uns selbst und unseren Standpunkt im Raume. Indessen giebt es eine Reihe von Erscheinungen, welche unabhängig sind von der Bestimmung des Mittelpunkts der Richtungslinien. Es sind dies namentlich alle diejenigen, welche beim Sehen entfernter Objecte eintreten können, der Sterne zum Beispiel oder auch weit entfernter Berge und Gebäude. Denn solche Objecte sind nothwendig auch gross, und jede Richtungs-

linie, die durch irgend einen Punkt unseres Kopfes oder auch unseres Körpers geht, parallel einer bestimmten Richtung, wird das Object treffen.

Die Richtung, in der die Objecte des Sehfeldes liegen, wird im Allgemeinen, abgesehen von den schon bisher besprochenen Täuschungen, bestimmt sein, sobald erstens die Richtung der Blicklinie und zweitens die Richtung irgend eines durch den Blickpunkt gehenden Meridians gegeben ist.

Die Richtung, in welcher der Blickpunkt liegt, wechselt mit der Stellung des Auges gegen den Kopf, beziehlich gegen den Körper; indessen sind wir im Allgemeinen im Stande, die jedesmalige Richtung der Blicklinie richtig zu beurtheilen. Man hat die Empfindungen, auf denen die Wahrnehmung der durch Muskelwirkung veränderten Stellung der Theile unseres Körpers beruht, das Muskelgefühl genannt. Unter diesem Ausdruck sind aber mehrere wesentlich verschiedene Empfindungen von einander zu trennen. Wir können nämlich wahrnehmen

1. die Intensität unserer Willensanstrengung, durch welche wir die Muskeln in Wirksamkeit zu setzen suchen;
2. die Spannung der Muskeln, also die Kraft, mit der diese zu wirken streben;
3. den Erfolg der Anstrengung, der, abgesehen von seiner Wahrnehmung durch andere Sinnesorgane, namentlich Gesicht und Getast, am Muskel sich äussert durch wirklich eintretende Verkürzung, wobei auch an den Gliedern veränderte Spannung der sie bedeckenden Haut möglicher Weise wahrgenommen werden kann.

Ich kann bei sehr ermüdeten Muskeln zum Beispiel im Stande sein, wahrzunehmen, dass ich den äussersten Grad von Willensanstrengung aufbiete, um die Muskeln in Spannung zu versetzen, dass aber deren Spannung nicht mehr genügend ist, den Erfolg zu erreichen. Andererseits kann ich bei kräftigen Muskeln durch eine mässige Willensanstrengung eine deutlich fühlbare Spannung der Muskeln hervorbringen, ohne doch wegen irgend eines äusseren Widerstandes den Erfolg zu erreichen, den ich wünsche. Alle diese Fälle unterscheiden sich in meiner Wahrnehmung von dem Falle, wo ich den Erfolg wirklich erreiche, und wir müssen diese verschiedenen Umstände auch in der Theorie des Muskelgefühls unterscheiden.

Wir beschränken uns in der vorliegenden Untersuchung natürlich auf die beim Auge vorkommenden Verhältnisse.

Zunächst zeigen bekannte Erfahrungen, dass wir die Richtung unseres Blicks nicht nach der wirklich vorhandenen Stellung unseres Auges beurtheilen, wenn dieselbe durch andere Kräfte als die unserer Muskeln verändert ist. Wenn man auf den von den Lidern bedeckten Theil des Augapfels drückt, oder die den Augapfel umgebende Haut zerrt, so werden dadurch kleine Aenderungen in der Stellung des Augapfels selbst hervorgebracht. Am besten gelingt dies dadurch, dass man am äusseren Augenwinkel eine Hautfalte zusammenkneift und dann das Auge nach innen wendet, so dass die den Augapfel bedeckende Bindehaut an der äusseren Seite gespannt wird. Oeffnet man beide Augen, indem man an der Hautfalte zerrt, so erhält man Doppelbilder, indem das Bild des

gezerrten Auges nach einer anderen Richtung hin verlegt wird, als das Bild des andern, und öffnet man nur das erstere Auge, so sieht man bei jedem Zuge an der Hautfalte eine Scheinbewegung der Gegenstände im Gesichtsfelde eintreten. Jeder gerade nach aussen am rechten Auge gerichtete Zug lässt die Gegenstände scheinbar nach links hin weichen. Die Richtung der Gesichtslinie wird hierbei nach rechts hin verschoben; wir beurtheilen aber die Lage der Gegenstände so, als wenn durch die Zerrung die Richtung der Gesichtslinie unverändert bliebe.

Dem entsprechend zeigt sich, dass die Lage der Nachbilder, im geschlossenen Auge oder auf einen gleichmässigen unbegrenzten Schirm projicirt, bei der Zerrung scheinbar unverändert bleibt, während diese Bilder wirklich mit dem Auge bewegt werden.

Dagegen lässt auch während einer solchen Zerrung jede durch die Muskeln hervorgebrachte Bewegung der Augen die scheinbare Lage der äusseren Gegenstände unverändert, während die Nachbilder sich scheinbar bewegen.

Wenn wir so durch einen äusserlichen Zug den Augapfel nach aussen rollen, wird natürlich der innere gerade Muskel desselben um ebenso viel gedehnt und der äussere um ebenso viel kürzer, als wenn eine solche Rollung durch Muskelwirkung geschieht. Denn die Muskeln sind auch im ruhenden Zustande elastische Bänder, welche sich stets so weit verkürzen, als es die Lage ihrer Befestigungspunkte erlaubt.

Wir beurtheilen also die Richtung unserer Gesichtslinie weder nach der wirklichen Stellung des Augapfels, noch nach der von ihm abhängigen wirklichen Verlängerung oder Verkürzung der Augenmuskeln.

Dass wir die Richtung der Gesichtslinie auch nicht nach der Spannung der Augenmuskeln beurtheilen, geht daraus hervor, dass in solchen Fällen, wo Lähmungen einzelner Augenmuskeln plötzlich eingetreten sind, die Patienten, wenn sie ihr Auge nach einer Richtung zu bewegen streben, nach der sie es nicht mehr bewegen können, Scheinbewegungen sehen, die bei gleichzeitig geöffnetem anderen Auge Doppelbilder hervorbringen. Wenn also zum Beispiel der äussere gerade Muskel des rechten Auges oder sein Nerv gelähmt ist, so kann das Auge nicht mehr nach der rechten Seite herübergezogen werden. So lange der Patient es nur nach der inneren Seite wendet, macht es noch regelmässige Bewegungen, und er nimmt die Richtung der Objecte im Gesichtsfeld richtig wahr. Sobald er versucht es nach aussen, also nach rechts hin zu wenden, folgt es seinem Willen nicht mehr, sondern bleibt in der Mitte stehen und die Objecte bewegen sich scheinbar nach rechts, obgleich die Stellung des Auges und der Netzhautbilder im Auge unverändert bleibt.

In einem solchen Falle eines gelähmten Muskels tritt in Folge der Willensanstrengung weder Bewegung des Auges, noch Verkürzung der zu verkürzenden Muskeln, noch auch erhöhte Spannung in diesen Muskeln ein. Der Willensact hat ausserhalb des Nervensystems gar keine Folgen mehr und doch urtheilen wir über die Richtung der Gesichtslinie so, als hätte der Wille die normalen Wirkungen ausgeübt; wir glauben, dass die Gesichtslinie sich in dem letztgenannten Falle nach rechts verschoben habe, und da die Lage der Netzhaut-

bilder auf der Netzhaut des gelähmten Auges hierbei unverändert bleibt, erscheint uns das so, als machten die Objecte die irrthümlich vorausgesetzte Bewegung des Augapfels mit.

Ist die Lähmung nicht vollständig, so dass das Auge zwar noch ein nach aussen liegendes Object fixiren kann, dazu aber einen grösseren Aufwand von Innervation des gelähmten Muskels bedarf, als im normalen Zustande, so tritt doch eine falsche Vorstellung von der Richtung der Gesichtslinie und von der Lage des Objectes ein, wie man dadurch erkennen kann, dass man den Patienten schnell nach dem Objecte greifen lässt. Er greift dann zuerst daneben [1].

Diese Erscheinungen lassen keinen Zweifel darüber, dass wir die Richtung der Gesichtslinie nur beurtheilen nach der Willensanstrengung, mittels der wir die Stellung der Augen zu ändern suchen. Es giebt zwar auch gewisse schwache Empfindungen in unsern Augenlidern, wenn sich die Hornhaut unter ihnen verschiebt, welche uns über die wirkliche Stellung des Auges einigermassen unterrichten könnten, und ferner fühlen wir bei angestrengten Seitenbewegungen der Augen eine ermüdende Spannung in den Muskeln, aber alle diese Empfindungen scheinen zu schwach und zu unbestimmt zu sein, als dass sie für die Wahrnehmung der Richtung verwerthet werden könnten.

Wir wissen also, welche Willensimpulse und wie stark wir sie anzuwenden haben, um das Auge in eine bestimmte beabsichtigte Stellung zu versetzen. Da unter den gewöhnlichen normalen Umständen sich der Bewegung des Auges keine fremden Hindernisse entgegensetzen, so kann auch meistens aus der Stärke des Willensimpulses der Effect genügend beurtheilt werden, viel vollständiger wenigstens, als dies bei den Extremitäten und den meisten andern beweglichen Theilen des Körpers möglich sein würde. Die einzige Wirkung des Willensimpulses, die wir am Auge direct und hinreichend deutlich wahrnehmen, ist die veränderte Lagerung der Objecte im Sehfeld bei der neuen Stellung des Auges. Es lässt sich nun zeigen, dass wir in der That diese Veränderungen des Bildes fortdauernd als Controlle für das richtige Verhältniss der Willensimpulse zu ihrem Effecte benutzen.

Man setze sich zwei Glasprismen von 16 bis 18 Grad brechenden Winkels in ein Brillengestell zusammen, so dass die brechenden Winkel beider nach links gekehrt sind. Die Gegenstände des Gesichtsfeldes erscheinen durch diese Prismen alle nach links von ihrem wirklichen Orte abgelenkt. Man vermeide es zunächst, die Hand in das Gesichtsfeld zu bringen, betrachte sich irgend ein bestimmtes erreichbares Object genau, schliesse dann die Augen und versuche mit geschlossenen Augen das Object mit dem Zeigefinger zu treffen; man wird natürlich links daneben vorbeifahren. Wenn man aber diese Versuche eine Weile fortgesetzt hat, oder noch schneller, wenn man die Hand in das Gesichtsfeld bringt und mit ihr kurze Zeit hindurch unter Leitung des Auges die Objecte betastet, so wird man finden, dass man bei Wiederholung des erst beschriebenen Versuchs nicht mehr vorbeifährt, sondern die Objecte richtig trifft;

---

[1] A. v. Graefe im Archiv für Ophthalmologie, Bd. I. Abth. I, S. 67. Anmerkung. — A. Nagel das Sehen mit zwei Augen, 1861, S. 124—129. Alfred Graefe im Archiv für Ophthalmologie XI. 2. S. 6—16.

ebenso auch neue Objecte, die man an Stelle der schon bekannten bringt. Hat man dies erreicht und versucht man nun, nachdem man die Hand aus dem Gesichtsfelde entfernt, die Prismen weggenommen und irgend ein Object angeblickt hat, dies bei geschlossenen Augen zu greifen, so wird man finden, dass man jetzt mit der Hand rechts vorbeifährt, bis durch mehrere vergebliche Versuche die Beurtheilung der Richtung, in der die Augen stehen, wieder berichtigt ist [1].

Dass hierbei nicht etwa das Muskelgefühl der Hand und die Beurtheilung von deren Ort, sondern die Beurtheilung der Blickrichtung gefälscht wird, ergiebt sich daraus, dass, wenn man, durch die Prismen blickend, sich gewöhnt hat, mit der rechten Hand die gesehenen Objecte zu treffen, und man die mit der rechten Hand berührten Objecte nun bei geschlossenen Augen mit der linken, vorher gar nicht benutzten und nicht im Gesichtsfelde gewesenen Hand zu treffen sucht, man sie ganz sicher und richtig trifft. Man bestimmt also in einem solchen Falle durch das Tastgefühl den Ort vollkommen richtig und weiss ihn nach dieser Angabe durch ein anderes tastendes Organ sicher zu finden.

Dass vierteljährige Kinder erst sehr langsam lernen ihre Hände nach Gesichtsobjecten hin zu dirigiren, wenn sie schon sehr gut wissen, sie nach dem Munde oder nach einer juckenden Hautstelle, also mittels Tastempfindungen, zu lenken, lehrt die Erfahrung. Wie also hier die Uebereinstimmung zwischen Augenbewegungen und Handbewegungen erst durch Versuche gelernt wird, so muss ihre Genauigkeit auch bei Erwachsenen durch immer erneute Versuche und Beobachtungen fortwährend controllirt werden.

Ich habe schon früher angeführt, dass die Uebereinstimmung der Bewegungen beider Augen in ähnlicher Weise gestört werden kann, wenn man durch ein Prisma das Bild des einen Sehfeldes allmählig in die Höhe schiebt; dann folgt das betreffende Auge, und beide Augen fahren fort einfach zu sehen, während das eine etwas mehr nach oben gerichtet ist als das andere. Auch hier kommt es schnell zur Gewöhnung, diese Stellung als die normale Fixationsstellung zu benutzen; und wenn man die Prismen fortnimmt, fährt man fort in derselben Weise zu fixiren, wobei man über einander stehende Doppelbilder der Objecte erhält, die sich erst bei einer Aenderung der Augenstellung schnell wieder vereinigen. Es zeigt sich hierbei, dass auch die übereinstimmende Stellung beider Augen nach dem Erfolg geregelt wird, indem man sich gewöhnt, solche Willensimpulse zu geben, welche geeignet sind, unter den obwaltenden Umständen beide Fixationspunkte auf dasselbe Object zu richten.

Es gehört hierher ferner die Erfahrung, dass, wenn man bewegte Objecte längere Zeit zu fixiren bemüht gewesen ist, nachher ruhende Objecte in der entgegengesetzten Richtung bewegt erscheinen. Man bezeichnet das Sehen dieser Scheinbewegungen als Schwindel. Wenn man zum Beispiel in einem Eisenbahnzug reiset und eine Weile nach den draussen dicht an der Bahn befindlichen Gegenständen geblickt hat, dann aber den Blick auf den Fussboden

[1] Der Versuch ist von Czermak im Wesentlichen ähnlich angegeben in Wien. Berichte. XVII, 575—577.

des Wagens wirft, so scheint dieser, der sich zum Körper des Reisenden in relativer Ruhe befindet, in Richtung des Zuges von ihm fort zu fliehen.

Es erklärt sich dies daraus, dass die Gegenstände an der Bahn eine scheinbare, der des Zuges entgegengesetzte Bewegung haben. So oft der Reisende einen derselben zu fixiren sucht, muss er seine Augen schnell der Richtung des Zuges entgegen bewegen. Nachdem er sich gewöhnt hat, die unter diesen Umständen ausgeübten Willensimpulse als die für die Fixation eines Objects geeigneten zu betrachten, versucht er in derselben Weise auch ruhende Objecte zu fixiren. Die genannten Willensimpulse bringen aber Bewegungen der Augen hervor, und da der Beobachter seine Augen für festgestellt hält, so scheinen sich ihm nun die Objecte und zwar der vorher angeschauten objectiven Bewegung entgegengesetzt zu bewegen.

Wenn man dagegen, während man aus dem Wagen blickt, etwa ein Pünktchen in der Fensterscheibe dauernd fixirt, so kommt der beschriebene Gesichtsschwindel nicht zu Stande, obgleich man wie vorher bewegte Objecte hat vorbeifliegen sehen, aber ohne die zu ihrer Fixation nöthigen Bewegungen zu machen. Bei ganz fester Fixation eines zum Auge relativ ruhenden Punktes verwischen sich übrigens auch die Bilder der bewegten Objecte vollständig bei der für diese Täuschung nöthigen Geschwindigkeit. Man kann diese nur erkennen, wenn man ihnen kurze Strecken mit den Augen folgt. Die dazu nöthigen Augenbewegungen bleiben meist unbewusst, und sie sind deshalb von Plateau[1] und Oppel[2], welche über diese Erscheinungen Beobachtungen angestellt haben, nicht bemerkt worden. Dass aber solche Augenbewegungen vorhanden sind, folgt aus dem Umstand, dass bei absolut fester Fixation die bewegten Bilder sich verwischen.

Dasselbe beobachtet man bei dem Drehschwindel, wenn man sich mit offenen Augen eine Weile um seine eigene Längsaxe gedreht hat. So wie man anhält, scheinen die Objecte sich noch eine Zeitlang in der Richtung fortzubewegen, in der man sich gedreht hat. Ich finde, dass nach einer Drehung mit geschlossenen Augen diese Art der Scheinbewegung nicht eintritt, so bald man die Augen erst öffnet, wenn man wirklich bis zum festen Stehen gekommen ist. Thut man es früher, so tritt eine Scheinbewegung der Gegenstände entgegengesetzt der bisherigen Drehung des Körpers ein; aber man überzeugt sich auch leicht, dass der Körper auf den Füssen noch etwa eine Viertelkreisdrehung ausführt, ehe er wirklich zur Ruhe kommt, zu einer Zeit, wo man ihn schon für ruhend hält. Dann ist also eine Täuschung über die Haltung des Körpers Ursache der Scheinbewegung der Objecte. Zuweilen kommt übrigens auch diese der objectiven Drehung des Körpers entgegengesetzte Schwindelbewegung nach der Drehung mit offenen Augen zum Vorschein, wie denn überhaupt dieser Versuch nicht so rein ist wie die andern, bei denen der Körper des Beobachters nicht mitbewegt wird.

Es kommen auch solche Arten von Gesichtsschwindel vor, wo verschiedene

---

[1] Plateau in Poggendorff's Annalen, LXXX, 287. — *Bull. de Bruxelles*, XVI.
[2] Oppel ebenda, XCIX, 513.

Theile des bewegten Körpers verschieden gerichtete Bewegung gehabt haben. Wenn man z. B. die in *Fig. 150*, S. 381 dargestellte Scheibe mit der Spirale rotiren lässt, so scheint die Spirale, je nach der Richtung ihrer Drehung, sich entweder fortdauernd auszudehnen oder zusammenzuziehen. Hält man die Scheibe plötzlich an, so scheint sie nachher sich einen Augenblick zusammenzuziehen, wenn sie sich vorher ausdehnte, oder auszudehnen, wenn sie sich vorher zusammenzog. Und auch andere Objecte, z. B. ein bedrucktes Blatt Papier, was man unmittelbar nach der Spirale betrachtet, zeigen eine solche Contractions- oder Dilatationsbewegung.

Viel weniger deutlich ist eine ähnliche Schwindelbewegung, die sich nach Anblick einer rotirenden sternförmigen Figur einstellt, und wobei der objectiv ruhende Körper, den man betrachtet, sich ein wenig in entgegengesetzter Richtung zu drehen scheint, als der Stern.

Am deutlichsten werden diese letztern Scheinbewegungen, wenn man den Blick nach dem ruhenden Mittelpunkte der Axe richtet, dabei aber im indirecten Sehen auf die bewegte Figur achtet, welche nicht so schnell rotiren darf, dass man ihre einzelnen Züge nicht mehr wahrzunehmen im Stande wäre, aber auch nicht so langsam, dass man sie ganz ohne Schwierigkeit wahrnimmt. Wenn man ganz scharf den Mittelpunkt der Axe fixirt und nur auf diesen achtet, so hat man allerdings auf den Seitentheilen der Netzhaut ebenso, wie vorher die bewegte Figur, aber die Schwindelbewegung tritt nicht ein. Es scheint mir daraus hervorzugehen, dass bei diesem Achten auf die bewegte Figur leise Augenbewegungen im Spiele sind, wahrscheinlich kreisförmige Bewegungen, deren Richtung immer auf denjenigen Theil des Sehfeldes hinzielt, auf den die Aufmerksamkeit des indirecten Sehens gerade gerichtet ist. In der That würde ohne solche Bewegungen, die der bewegten Figur nachfolgen, die letztere nicht ganz so deutlich erscheinen können, als sie es bei derjenigen Art des Anblickens thut, die den Schwindel entwickelt. Wenn dieselbe Art des Blickens nachher auf einen ruhenden Gegenstand angewendet wird, muss dieser natürlich eine entgegengesetzte Scheinbewegung zeigen.

So lange wir eine grosse Zahl ruhender Gesichtsobjecte vor uns haben, ist es leicht, an diesen fortdauernd sich über den Grad der Innervation zu vergewissern, der nöthig ist, um das Auge in bestimmten Stellungen festzuhalten. Wenn man dagegen überwiegend bewegte Massen vor sich hat, ist es schwer, das Urtheil über Ruhe und Bewegung richtig zu erhalten. Wenn man auf einem Balken über einen schnell fliessenden Bach gehen will, muss man vermeiden nach dem Wasser zu sehen, um nicht das Gleichgewicht zu verlieren. Wenn man auf einem der unteren Gerüste des Schlosses L a u f e n an den Rheinfall herantritt und nichts vor sich sieht als die stürzende Wassermasse, so entsteht eine Neigung hintenüber zu fallen. Eben deshalb wird man auf Schiffen so verwirrt in der Orientirung; man fühlt den Zug der Schwere scheinbar bald nach rechts, bald nach links, bald nach vorn oder nach hintengehend, weil man die Richtung der Verticale nicht mehr zu finden weiss. Nach längerer Gewöhnung erst lernt man, wie ich an mir selbst erfahren habe, die Schwerkraft als Orientirungsmittel brauchen, und dann hört auch der Schwindel

auf. Dem Neuling scheint in der Cajüte eines Schiffs das in Cardanischer Aufhängung befestigte Barometer hin und her zu schwanken, welches in Wirklichkeit immer senkrecht hängt, die Cajüte dagegen festzustehen, während ihn selbst die Schwerkraft bald hier, bald dorthin zerrt. Sobald man den Schwindel verloren hat, sieht man das Barometer feststehen und die Cajüte schwanken. Wie sehr aber hierbei die Sicherheit der Innervation der Augenmuskeln zeitweilig leidet, zeigt sich daran, dass Passagiere, die seekrank waren, sogar nachher am Lande, bei jeder schnellen Bewegung der Augen die Wände des Zimmers, in dem sie sich befinden, scheinbar dieselben Bewegungen ausführen sehen, welche die Cajüte des Schiffs zu machen pflegte.

Alle diese Erscheinungen lassen deutlich erkennen, dass eine fortdauernde Controlle der für die Augenstellungen und Augenbewegungen nothwendigen Innervationsstärke durch die Beobachtung ihres Erfolgs an den Gesichtsbildern stattfinden muss, wenn richtige Urtheile über die Richtung der Gesichtslinie und der fixirten Gegenstände gefällt werden sollen.

Eine andere Art von Täuschung, die hierher gehört, hat F. Zöllner [1] beschrieben. Man zeichne auf ein Blatt Papier einen Kreis und schneide in ein anderes dunkles und steifes Blatt einen Schlitz, der länger ist als der Durchmesser des Kreises und dessen Breite $^1/_{10}$ bis $^3/_{10}$ dieses Durchmessers beträgt. Man halte das Blatt mit dem Schlitz fest und schiebe unter ihm das Blatt mit dem Kreise hin und her, so dass der Kreis selbst hinter dem Schlitz sich vollständig vorbeischiebt, bald in der einen, bald in der anderen Richtung. Unter diesen Umständen erscheint der Kreis wie eine Ellipse, deren grössere Axe senkrecht zur Richtung der Bewegung gestellt ist. Der Grund davon ist darin zu suchen, dass der Beobachter, indem er die bewegte Figur zu sehen sich bestrebt, unwillkührlich und ohne es deutlich zu wissen, ihr mit den Augen folgt, aber mit geringerer Geschwindigkeit. Dadurch entstehen nach einander auf den verschiedenen Streifen der Netzhaut, auf denen der Spalt während dieser Bewegung sich abbildet, Eindrücke von dem gerade vorliegenden Stücke des Kreises gerade wie bei dem Anorthoskop, nur dass bei diesem der Spalt selbst bewegt, das Auge ruhig ist, während hier das Auge bewegt ist und der Spalt stillsteht. Der optische Eindruck ist hierbei derselbe, als ob der Spalt sich in entgegengesetzter Richtung wie das Auge bewegte, also auch entgegengesetzt dem bewegten Bilde, und dies giebt im Anorthoskop, wie oben S. 352—354 auseinandergesetzt ist, eine scheinbare Verkürzung der Figur nach der Richtung der Bewegung.

Dass Augenbewegungen der Grund dieser Täuschung sind, kann man daraus erkennen, dass man bei der Geschwindigkeit, welche die Täuschung am besten zeigt, überhaupt nichts mehr von der Figur erkennen kann, sobald man ganz fest einen Punkt am Rande des Spalts fixirt. Um die Figur erkennen zu können, muss man ihr eben mit dem Auge folgen. Ausserdem kann ein zweiter Beobachter auch solche Augenbewegungen bemerken, wie Zöllner gefunden hat.

[1] Ueber eine neue Art anorthoskopischer Zerrbilder in Poggendorff's Annalen, 1862.

Wenn man den Kreis sehr langsam hinter dem Spalte vorbeizieht, so erscheint er im Gegentheil in Richtung der Bewegung verlängert zu sein. Das mag davon herrühren, dass die Theile der Begrenzungslinie, welche im Spalte erscheinen, wegen der scheinbaren Vergrösserung der spitzen Winkel steiler gegen die Seiten des Spaltes zu stehen scheinen, als sie wirklich sind. Dasselbe würde aber in Wirklichkeit der Fall sein, wenn eine quer verlängerte Ellipse hinter dem Spalt vorbeigezogen würde, daher der Beobachter denn die Figur als eine solche Ellipse deutet.

Nachdem wir uns durch die vorher beschriebenen Thatsachen überzeugt haben, dass die Uebereinstimmung zwischen den Wahrnehmungen durch das Gesicht und denen des Tastsinns auch beim ausgebildeten Auge eines Erwachsenen dauernd nur durch die fortlaufende Vergleichung mit der Erfahrung erhalten wird, erledigt sich die so übermässig viel verhandelte Frage über den Grund, warum wir die Gesichtsobjecte aufrecht sehen trotz des verkehrten Netzhautbildes, ganz von selbst. Der Tastsinn an und für sich ist fähig, vollständige Raumanschauungen auszubilden, selbst ohne alle Hilfe durch den Gesichtssinn; wir wissen dies durch die Erfahrungen an blindgeborenen Personen. Ja, die Richtung der Schwere, welche das Oben und Unten bestimmt, wird sogar ausschliesslich durch den Tastsinn und nicht durch den Gesichtssinn unmittelbar wahrgenommen. Dass die Gesichtsempfindungen an und für sich, ohne alle vorausgängige Erfahrung Vorstellungen von einer bestimmten Richtung des Gesehenen horvorrufen sollen, ist eine, wie mir scheint, vollkommen unnöthige Hypothese, und noch weniger begründet ist vom Standpunkte der empiristischen Ansicht aus die Voraussetzung, dass die Vorstellung der Richtung hierbei sogar beeinflusst sein soll durch den Ort, wo sich das Bild auf der Netzhaut befindet, dass ein unten abgebildeter Punkt auch deshalb unten erscheinen müsste, während doch das natürliche Bewusstsein nicht einmal von der Existenz einer Netzhaut oder optischer Bilder auf ihr, geschweige denn von der Lage derselben etwas weiss.

In der nativistischen Theorie der Sinneswahrnehmungen, wo man voraussetzt, dass die Nervenreizung auch unmittelbar und unabhängig von aller Erfahrung die Vorstellung eines gewissen Orts des wahrgenommenen Objects hervorbringen soll, muss allerdings vorausgesetzt werden, dass die angeborenen Localisationen durch das Gesicht in einer gewissen angeborenen Uebereinstimmung mit denen durch den Tastsinn sich befinden, sei es nun, dass man sich denkt, die Sehnervenfasern, welche von den unteren Seiten der Netzhäute kommen, wendeten sich im Gehirn nach oben, und es entstände dort ein richtig gestelltes Bild der Objecte, was die Seele anschaute, oder dass man das Anschauen in den Netzhäuten vor sich gehen lässt und die Tastwahrnehmungen entsprechend den auch verkehrt gesehenen eigenen Händen und Beinen des Beobachters ebenfalls verkehrt in dieses Anschauungsbild eintragen lässt, wo dann also alle unsere Raumvorstellung verkehrt sein und bleiben würde. Es ist hier natürlich der weiteste Spielraum für die wildesten Hypothesen eröffnet.

Ich meine, dass eine angeborene Uebereinstimmung der Localisationen durch den Gesichtssinn und Tastsinn den Erfahrungen gegenüber, welche die Wirk-

samkeit der fortdauernden Controlle für die richtigen Beziehungen beider Sinne auf einander durch die Erfahrung beweisen, nicht festgehalten werden kann, weil man sonst in die Schwierigkeit kommt, dass die angeblich angeborene und durch unmittelbare Empfindung gegebene Uebereinstimmung jeden Augenblick durch Erfahrung, also durch Urtheilsacte so verändert und überwältigt werden kann, dass von dieser hypothetischen Empfindung sich gar nichts mehr merklich macht.

Meines Erachtens hat der Streit über den Grund des Aufrechtsehens nur das psychologische Interesse zu zeigen, wie schwer selbst Männer von bedeutender wissenschaftlicher Befähigung sich dazu verstehen, das subjective Moment in unseren Sinneswahrnehmungen wirklich und wesentlich anzuerkennen und in ihnen Wirkungen der Objecte zu sehen, statt unveränderter Abbilder (*sit venia verbo*) der Objecte, welcher letztere Begriff offenbar sich selbst widerspricht.

Wir haben bisher nur untersucht, in welchen Richtungen wir weit entfernte Objecte zu sehen glauben; es bleibt noch übrig, das Centrum zu bestimmen, auf welches diese Richtungslinien bezogen werden, was namentlich für die Beurtheilung der Richtung naher Objecte nicht gleichgültig ist. Gewöhnlich ist früher die Annahme gemacht worden, dass jedes Auge die gesehenen Gegenstände in Richtung der auf Seite 69 definirten Richtungslinien nach aussen setze, wonach dann die Richtungen, in denen nahe Gegenstände gesehen werden, im Allgemeinen für beide Augen verschieden sein würden. In dieser Beziehung hat aber neuerdings E. Hering auf eine merkwürdige Täuschung aufmerksam gemacht, vermöge deren wir die Richtung der gesehenen Gegenstände so wahrnehmen, als ob beide Augen in der Mittelebene des Kopfes ständen und auf ihren gemeinsamen Fixationspunkt gerichtet wären.

Es mögen im Anfang beide Augen *A* und *B*, *Fig. 187*, hinausblicken in parallelen Richtungen *Aa* und *Bb*, das Auge *B* aber möge dann geschlossen werden, während *A* noch immer das unendlich weit entfernte Object *a* fixirt und die Richtungen beider Augen also unverändert bleiben. Man sieht *a* unter diesen Umständen in richtiger Richtung. Jetzt accommodire man *A* für einen viel näher gelegenen Punkt *f* der Linie *Aa*, wobei also die Lage des Auges *A* und seiner Gesichtslinie *Aa*, so wie der Ort des Netzhautbildes von *a* auf der Netzhaut des Auges *A*, ganz unverändert bleiben und das Netzhautbildchen nur etwas weniger scharf begrenzt wird. Der Erfolg ist, dass eine Scheinbewegung des Objects *a* eintritt, wodurch es etwa in die Richtung *Ac* hinüberrückt. So wie man wieder für unendliche Ferne accommodirt, weicht *a* scheinbar an seinen ersten Platz zurück.

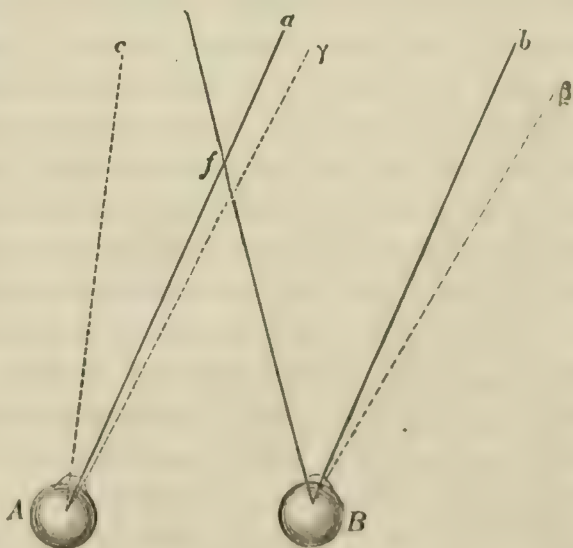


Fig. 187.

Nun verändert sich bei diesem Versuche durchaus nicht die Richtung der Gesichtslinie Aa, wenigstens nicht um eine bemerkbare und in Betracht kommende Grösse, sondern nur die Stellung des verschlossenen Auges B verändert sich, weil bei dem Streben, für den Punkt f zu accommodiren, sich gleichzeitig auch die andere Gesichtslinie auf f hinrichtet. Die Gesichtslinie des Auges B kommt also, während f fixirt wird, in die Richtung Bf.

Umgekehrt ist es mir möglich, meine Gesichtslinien etwas divergent zu machen auch bei geschlossenen Augen, so dass das Auge B in der Richtung $B\beta$ blickt. Diese Divergenz kann ich nur langsam erreichen und sehe deshalb keine deutliche Scheinbewegung. Dagegen tritt eine solche ein, wenn ich mit der Anstrengung für die Divergenz plötzlich nachlasse und nun die Gesichtslinien in parallele Stellung zurückspringen. Dabei sehe ich dann das Object a etwa aus der Stellung γ nach a zurückweichen.

Es hat also nicht nur die Stellung des sehenden Auges A, sondern auch die des geschlossenen Auges B Einfluss auf unsere Beurtheilung der Richtung, in der der fixirte Gegenstand liegt. Wenn das geöffnete Auge unbeweglich stehen bleibt, das geschlossene Auge sich aber nach rechts oder links bewegt, bewegt sich scheinbar auch der vom geöffneten Auge fixirte Gegenstand nach rechts oder links.

Für meine beiden Augen ist die Grösse dieser Scheinbewegung ziemlich verschieden; sie ist gering, wenn das rechte geöffnet ist und fixirt, viel grösser, wenn das linke geöffnet, das rechte geschlossen ist. Die Richtung der Gesichtslinie wird also nach den Innervationen, welche auf beide Augen gleichzeitig ausgeübt werden, bestimmt und nicht allein nach der des geöffneten Auges. Dabei dürfen wir wohl vermuthen, dass die scheinbare Richtung der Gesichtslinie im Allgemeinen der mittleren Richtung der Gesichtslinien beider Augen entspricht, wobei aber bei Leuten, die gewöhnt sind, beim Mikroskopiren und Teleskopiren ein Auge vorzugsweise zu gebrauchen, die scheinbare Richtung sich der wahren Richtung der Gesichtslinie des bevorzugten Auges mehr annähert, als der des andern Auges. Genauere Aufschlüsse über die scheinbare gleichzeitige Richtung beider Gesichtslinien werden wir später durch das Phänomen der Doppelbilder erhalten.

Ich habe nun gefunden, dass auch für die scheinbare Lage des Netzhauthorizonts eine ähnliche Abhängigkeit von den Raddrehungen beider Augen besteht, wie für die scheinbare Richtung der Gesichtslinie.

Die darauf bezüglichen Versuche gelangen mir selbst am einfachsten in folgender Weise. Ich spannte über das eine Ende einer cylindrischen Röhre von etwa einem Fuss Länge einen schwarzen Faden als Durchmesser aus, nahm das andere Ende der Röhre vor ein Auge, während das zweite Auge geschlossen war, hielt vor das entferntere Ende der Röhre ein weisses Blatt Papier, so dass ich nichts von den Gegenständen des Zimmers sah, und suchte nun den schwarzen Faden durch Drehung der Röhre um ihre Längsaxe möglichst genau horizontal oder vertical zu stellen, und zwar mit parallel gerichteten Blicklinien, eine Bedingung, die ich auch bei verschlossenem zweiten Auge zu erfüllen gelernt habe. Wenn ich dann das weisse Papier von dem vorderen Ende der

Röhre wegzog, konnte ich die Richtung, welche ich dem Faden gegeben hatte, mit der Richtung verschiedener objectiver horizontaler und verticaler Linien vergleichen, die sich im Zimmer vorfanden. Ich setzte mich bei diesen Versuchen fest auf einen Lehnstuhl und bog den Kopf bald vornüber, bald hintenüber, oder hielt ihn vertical, während die Röhre immer horizontal gehalten, dabei aber bald gerade aus, bald nach rechts, bald nach links gerichtet wurde, so dass sich dabei die Blicklinie nach einander in alle möglichen Lagen gegen den Kopf einstellte.

Es zeigte sich, dass ich in allen diesen Stellungen, soweit das Auge sich ohne fühlbaren Zwang bewegen konnte, bei parallelen Blickrichtungen die horizontal erscheinende Linie wirklich horizontal stellte und die vertical scheinende nur um einen solchen Winkel von der wirklich verticalen abweichen liess, wie der scheinbar verticale Meridian des betreffenden Auges vom wirklich verticalen abweicht.

Es geht also namentlich aus diesen Versuchen hervor, dass keineswegs in jeder Stellung des Auges der ursprünglich horizontale Meridian, den wir Netzhauthorizont genannt haben, immer für horizontal und der darauf senkrechte für vertical gehalten wird [1]. Im Gegentheil bei seitlich und stirnwärts oder wangenwärts gerichtetem Blick kann der Netzhauthorizont Winkel bis zu zehn Graden mit der Horizontalebene machen, und doch wird auch dann eine wirklich horizontale und in der horizontalen Visirebene liegende Linie für horizontal gehalten.

Anders gestaltet sich die Sache, wenn man die Augen convergiren lässt. Man schaue bei hintenüber gebogenem Kopfe durch das horizontal geradeaus gerichtete Rohr und richte den Faden bei parallelen Gesichtslinien horizontal. Prüft man seine Richtung, so findet man ihn dann, wie gesagt, wirklich horizontal. Jetzt fixire man einen Punkt des Fadens selbst, oder accommodire möglichst für die Nähe, während die Richtung des Blicks unverändert bleibt. Sogleich erleidet der Faden eine sehr auffallende scheinbare Drehung, und zwar in dem Sinne, wie sich der Netzhauthorizont des anderen Auges des Beobachters dreht, indem dieses Auge aus der Parallelstellung in die Convergenzstellung übergeht. Blickt man also zum Beispiel bei hinten übergebogenem Kopfe mit dem rechten Auge horizontal gerade aus, so senkt sich bei eintretender Convergenz das rechte Ende des Fadens scheinbar, während sich das linke hebt. Bei vornübergebogenem Kopfe ist es umgekehrt. Umgekehrt auch für das linke Auge. Soll der Faden bei convergenten Augen horizontal erscheinen, so muss die Röhre um einige Grade im entgegengesetzten Sinne seiner scheinbaren Ablenkung gedreht werden, worauf er bei wiederhergestellten parallelen Blickrichtungen nicht mehr horizontal erscheint. Die hierbei anzuwendenden Drehungen der Röhre sind viel bedeutender, als die ausserordentlich kleinen wirklichen Drehungen meines beobachtenden Auges bei eintretender Convergenz des andern (siehe Seite 469) und können durch diese nicht erklärt werden [2].

---

[1] Herr E. Hering hat die Regel in dieser Form aufgestellt (Beiträge zur Physiologie S. 254), aber er hat nicht in parallelen Augenstellungen experimentirt und nicht in solchen Blickrichtungen, wo sich die Abweichung hätte zeigen können, da sein Fixationspunkt immer in der Medianebene lag.

[2] Messungsreihen über die Grösse dieser Winkel konnte ich nicht machen, weil oft wiederholte starke Accommodationsanstrengungen mir bald heftiges Kopfweh machen.

Wir haben hier vielmehr eine Erscheinung gleicher Art, wie bei der Beurtheilung der Richtung der gesehenen Gegenstände. Trotz der unveränderten Haltung des sehenden Auges bringt die veränderte Richtung und Drehung des nicht sehenden ein verändertes Urtheil über die Richtungen der horizontalen und verticalen Linien hervor.

Da nicht alle Beobachter die Fähigkeit haben, willkührlich ohne entsprechenden Fixationspunkt ihre Augen parallel oder convergent zu stellen, habe ich die Methode für parallele Gesichtslinien noch in folgender Weise abgeändert. Vor einer breiten einförmig angestrichenen grauen Wand wurde ein langer schwarzer Faden mit einem kleinen Gewichte vertical aufgehängt. An dem Gewichte waren rechts und links noch horizontale Fäden befestigt, die durch Ringe gingen. Einer dieser Fäden wurde durch ein kleines Gewicht gespannt gehalten, der andere war zum Beobachter hingeleitet, der etwa sechs Fuss von dem verticalen Faden entfernt sass, und je nachdem der Beobachter diesen Faden anzog oder nachliess, wurde der verticale Faden etwas nach rechts oder links von der Verticallinie abgelenkt. Der Beobachter blickte durch eine cylindrische, horizontal gehaltene Röhre nach dem verticalen Faden, so dass er keine anderen verticalen oder horizontalen Linien im Gesichtsfelde hatte, und suchte jenen Faden genau vertical zu stellen. Das untere Ende des verticalen Fadens bewegte sich vor einer kleinen Scale, an der seine Ablenkung abgelesen werden konnte.

Nach dieser Methode hat Herr Dr. Dastich im hiesigen physiologischen Laboratorium Versuche angestellt. Sein linkes Auge, welches normalsichtig war, wurde hauptsächlich gebraucht, da das rechte kurzsichtig ist. Um den Faden vertical zu sehen, stellte er das untere Ende desselben stets etwas nach rechts, entsprechend dem Sinne der Abweichung des scheinbar verticalen vom wirklich verticalen Meridian. Die Abweichung von der Verticale betrug:

Linkes Auge.

Kopf senkrecht, geradeaus sehend:	1° 52′
nach rechts sehend:	2° 4′
nach links sehend:	1° 49′
Kopf vorgebeugt, geradeaus sehend:	1° 37′
rechts oder links sehend:	2° 22′
Kopf zurückgebeugt, geradeaus sehend:	1° 37′
rechts oder links sehend:	2° 7′

Rechtes Auge.

Kopf senkrecht, geradeaus sehend:	— 0° 42′.

Die Schrägstellungen waren alle so weit von der Primärstellung entfernt, als es ohne fühlbare Anstrengung der Augenmuskeln anging. Zwischen den nach unten rechts und nach unten links gekehrten Blickrichtungen hätte sich ein Unterschied von etwa 16° zeigen müssen, wenn immer derselbe Meridian des Auges der verticalen Richtung entspräche; statt dessen war der Unterschied unmerklich klein. Ebenso bei den nach oben rechts und oben links gekehrten Blickrichtungen. Die kleinen Unterschiede, welche sich überhaupt zwischen den Winkeln des linken Auges hier zeigen, mögen von kleinen Un-

regelmässigkeiten der Augenbewegung herrühren, vielleicht auch von dem Umstande, dass die Blickrichtungen zwar nahehin, aber doch nicht absolut parallel waren. Nach brieflichen Mittheilungen sind die Linien, welche Herr A. Volkmann als senkrecht einstellt bei parallelen Gesichtslinien weder immer absolut senkrecht, noch mit dem verticalen Meridiane übereinstimmend, sondern scheinen etwa mitten zwischen der Richtung einer absolut verticalen Ebene und der des verticalen Meridians des Auges zu liegen. Herr Volkmann ist kurzsichtiger als Herr Dastich und ich selbst, und es könnte diese Abweichung vielleicht davon herrühren, dass kurzsichtige Augen überhaupt bei parallelen Blicklinien nicht genau genug sehen, um eine sichere Einübung zu gewinnen.

Die Differenz, welche durch die Convergenzstellungen entsteht, kann man bei diesen Versuchen dadurch nachweisen, dass man erst den entfernten langen Faden senkrecht einstellt, dann bei derselben Kopfhaltung den in der Röhre ausgespannten Faden, diesen fortdauernd fixirend, und endlich die Stellung beider Fäden vergleicht.

Wenn man endlich mit convergentem Blicke einen Punkt in der Medianebene des Kopfes fixirt, so werden, wie Hering [1] gefunden hat, Linien für horizontal gehalten, welche der Lage des Netzhauthorizonts des betreffenden Auges entsprechen. Er steckte zu dem Ende zwei Cylinder vom Durchmesser des Gesichts in einander, deren Länge etwa 5 — 6 Zoll betrug. Ueber das vordere Ende eines dieser Cylinder war ein Faden gespannt, dessen Mitte fixirt wurde und der durch Drehung des Cylinders scheinbar horizontal gestellt werden konnte. Die Einstellung wurde 10 bis 20 mal wiederholt und dann das Mittel genommen.

Die beschriebenen Thatsachen zeigen, dass in Bezug auf die Raddrehungen ein ähnlicher Einfluss beider Augen besteht, wie in Bezug auf die Beurtheilung der Richtungen, und es scheint, dass man die bisher vorliegenden Thatsachen (die allerdings noch genaueren Messungen unterzogen werden müssen) unter folgende Regel anschaulich vereinigen kann, welche eine Erweiterung des von Hering für die Richtungen des Sehens aufgestellten Princips sein würde.

Man denke sich in der Mitte zwischen beiden Augen ein imaginäres mittleres Cyclopenauge, welches auf den gemeinsamen Fixationspunkt beider Augen gerichtet ist, und dessen Raddrehungen nach demselben Gesetze erfolgen, wie die der beiden wirklichen Augen. Man denke sich die Netzhautbilder aus einem der wirklichen Augen in dieses imaginäre Auge übertragen, so dass Blickpunkt auf Blickpunkt und Netzhauthorizont auf Netzhauthorizont fällt. Dann werden die Punkte des Netzhautbildes nach aussen projicirt, in der Richtungslinie des imaginären Cyclopenauges [2].

Stellen wir also zum Beispiel unser rechtes Auge fest, lassen aber das linke aus paralleler in convergente Stellung übergehen, also sich nach rechts

---

[1] Beiträge zur Physiologie S. 254 — 256. Die Polemik, welche Herr Hering, auf diesen Versuch gestützt, gegen mein Princip der leichtesten Orientirung geführt hat, und ebenso die Begründung seines dagegen aufgestellten Princips der vermiedenen Scheinbewegung fällt aber zu Boden, weil das Resultat dieses Versuchs mit seinen Angaben nur übereinstimmt, wenn der Fixationspunkt in der Medianebene liegt.

[2] Der wesentliche Unterschied gegen die Regel von Hering ist, dass ich das Cyclopenauge Raddrehungen machen lasse, während Hering dessen Netzhauthorizont immer in der Visirebene liegen lässt.

bewegen, wobei es im Allgemeinen auch eine Raddrehung machen wird, so müsste sich auch das Cyclopenauge um einen etwa halb so grossen Winkel nach rechts drehen und eine etwa halb so grosse Raddrehung machen. Die Folge davon ist, dass die Gesichtsbilder des rechten ruhenden Auges scheinbar um denselben Winkel verschoben und gedreht werden, wie das Cyclopenauge.

So lange der Fixationspunkt in der Medianebene liegt, erleidet das Cyclopenauge keine Raddrehung, und dem entsprechend erscheinen für alle diese Stellungen die Netzhauthorizonte horizontal.

Um die Erklärung dieses sonderbaren Verhaltens zu geben, müssen wir uns erinnern, dass unser natürliches Sehen binocular ist, und dass wir unmittelbar aus der Erfahrung nur lernen die Lagenverhältnisse von Körpern, die wir fixiren, zu beurtheilen in Beziehung auf die Lage unseres eigenen Körpers, den wir fühlen. Rechts für uns ist ein Körper, der rechts von der Mittelebene unseres Körpers liegt, der aber, wenn er dieser näher als unser rechtes Auge ist, mit schwacher Linkswendung des rechten Auges bei starker Rechtswendung des linken gesehen werden kann. Wir gehen nicht darauf aus, die Richtung der Objecte gegen jedes einzelne unserer Augen, nicht einmal gegen unseren Kopf, sondern vielmehr gegen unseren Rumpf, als den Träger unserer Bewegungsorgane zu beurtheilen. Auf die letztere Beziehung kommt es in praktischer Beziehung wesentlich an.

Das sinnliche Zeichen für ein rechts gelegenes Object ist also nicht, dass eines oder beide Augen bei seiner Fixation nach rechts gewendet sind, sondern nur, dass ihre mittlere Richtung nach rechts gewendet ist. Die Eindrücke der einzelnen Augen von einander zu sondern, sind wir auch nur in wenigen Fällen geübt, nämlich in denen, wo es praktische Wichtigkeit hat, wie beim zweiäugigen Sehen von Körpern. Daher sind wir gut geübt, die gemeinsame mittlere Richtung und Drehung beider Augen wahrzunehmen und nach ihr die Lage der fixirten Objecte zu beurtheilen, aber schlecht geübt, die Richtung jedes einzelnen Auges zu beurtheilen oder überhaupt im Bewusstsein zu trennen, was dem einen oder anderen Auge angehört.

Wenn wir also von Richtung des Sehens reden, so sind wir nicht gewöhnt und nicht geübt die verschiedene Richtung beider Augen von einander zu unterscheiden, und beziehen diese Richtung überhaupt auf die Mittelebene unseres Kopfes, beziehlich unseres Körpers. In diesem Sinne hat HERING Recht, wenn er die Projectionen beider Augen in das Gesichtsfeld auf einen gemeinsamen Mittelpunkt, der zwischen beiden in der Mittelebene des Körpers, in der Gegend des Nasenrückens liegt, bezieht. Es ist dies ein richtiger Ausdruck der Thatsachen, wenn ich es auch nicht, wie der genannte Beobachter, als ursprüngliches Fundament für die Erklärung der Gesichtserscheinungen benutzen möchte, schon deshalb nicht, weil auf einen Theil der hierher gehörigen Erscheinungen die Richtung der Aufmerksamkeit einen merklichen Einfluss hat.

Man blicke mit einem Auge nach einem entfernten Objecte und halte vor den unteren Theil des Gesichtes ein Blatt Papier so, dass man die eigenen Hände und Arme nicht sehen kann. Man schiebe dann den Zeigefinger der rechten Hand unter dem deckenden Schirme so in die Höhe, als wollte man

nach dem gesehenen Gegenstande hinzeigen. Der Finger wird hinter dem Papier links von dem fixirten Gegenstande zum Vorschein kommen, wenn man mit dem rechten Auge hinblickt, rechts, wenn man mit dem linken sieht.

Umgekehrt ist der Erfolg, wenn man nicht nach einem entfernten Objecte, sondern nach einem nahen, etwa einem Pünktchen am Rande des Papierschirmes, blickt und den Finger in grösserer Entfernung so hervorzuschieben sucht, dass er gerade hinter diesem Pünktchen erscheine.

Dieser Erfolg entspricht der von Hering aufgestellten Regel. Beim gewöhnlichen unbefangenen Sehen beziehen wir die Sehrichtungen auf unsere Nasenwurzel und schieben den Finger ein zwischen diese und das fixirte Object, wobei er denn in der That nicht in die wirkliche Gesichtslinie zu liegen kommt.

Der hier beschriebene Versuch misslingt aber auch oft. Wenn ich nämlich meine Aufmerksamkeit auf den Umstand concentrire, dass ich nur mit dem rechten Auge sehe und lebhaft an den Ort des rechten Auges im Kopfe denke und dann den Finger vorschiebe, um das fixirte Object zu verdecken, so schiebe ich ihn wirklich in der richtigen Richtung vor.

Wir kommen auf die hier besprochenen Erscheinungen noch wieder zurück in der Lehre vom Doppelsehen.

Hierher gehört auch die Erfahrung, die ich oft gemacht habe, dass, wenn ich bei geschlossenen Augen einen Zeigefinger in die Höhe halte und ihn mit noch geschlossenen Augen zu fixiren suche, ich im Moment des Oeffnens Doppelbilder des Fingers sehe, welche parallele oder fast parallele Richtung der Blicklinien anzeigen, wobei diese Linien auf beiden Seiten ungefähr gleich weit am Finger vorbeischiessen. Sonderbarer Weise erhalte ich aber eine deutlichere Vorstellung vom Orte des Fingers, wenn ich bei geschlossenen Augen seine Spitze mit dem Daumen derselben Hand berühre und reibe. Dann bin ich in der That im Stande, schon bei geschlossenen Lidern die Augen so einzustellen, dass ich den Finger einfach sehe im Augenblick, wo ich sie aufschlage. Dasselbe geschieht auch, wenn ich mit dem Finger einen äusseren festen Körper berühre und betaste.

Wenn nun endlich durch die Vergleichungen der Tast- und Gesichtswahrnehmungen die Kenntniss der Richtung gewonnen ist, in der wir die gesehenen objectiven Gegenstände zu suchen haben, so ergiebt sich daraus auch schliesslich die Localisation der anderweitig entstandenen optischen Bilder und subjectiven Erregungen unserer Netzhaut und unseres Sehnervenapparats.

Wir verlegen nämlich alle Erregungen der Sehnervenfasern nach dem Gesetze hinaus in den Raum, dass wir Lichterscheinungen in denjenigen Theilen des Sehfeldes oder beider Sehfelder zu haben glauben, in denen körperliche Objecte erscheinen würden, welche im Stande wären, durch ihr Licht die entsprechenden Stellen der Netzhäute zu beleuchten. Die Richtigkeit dieser Behauptung zeigt sich einfach dann, wenn wir subjective Erscheinungen hervorrufen, während gleichzeitig wirkliche Objecte im Gesichtsfelde gesehen werden. Wenn wir z. B. ein Nachbild von der Sonne im Auge entwickelt haben und nach der Landschaft hinsehen, so deckt sich dieses Nachbild mit gewissen

äusseren Objecten, welche wir wegen der Existenz des Nachbildes schlechter sehen, als wir sonst gethan hätten. Gewisse Theile der Netzhaut sind ermüdet; die Bilder derjenigen äusseren Objecte, welche sich darauf abbilden, sind dunkler als sonst. Der Inbegriff dieser dunkleren Objecte im Gesichtsfelde ist das Nachbild. Es ist also selbstverständlich, dass das Nachbild im Gesichtsfelde zusammenfällt mit denjenigen Objecten, welche sich auf der ermüdeten Stelle der Netzhaut abbilden. Ebenso können Schatten entoptischer Objecte, Gefässfiguren, Druckbilder, elektrische Bilder im Gesichtsfelde mit äusseren Objecten zusammenfallen. Eine solche Coincidenz bewirkt allemal, dass die Empfindung des von aussen kommenden Lichts gewisser Punkte des Gesichtsfeldes entweder ausgelöscht, oder geschwächt, oder mit anderen subjectiven Lichtempfindungen gemischt wird. Indem wir die entsprechende Veränderung in dem Aussehen gewisser äusserer Punkte bemerken, kann natürlich die Veränderung im Gesichtsfelde nicht anders localisirt werden, als diejenigen Punkte, welche verändert erscheinen, schon localisirt sind, und die subjective Erscheinung muss nach denselben Regeln in die Aussenwelt hinausverlegt werden, welche als Ergebniss der Erfahrung für die durch wirkliches äusseres Licht wahrgenommenen Punkte erlernt worden sind.

Nun können freilich einzelne subjective Lichterscheinungen auch im ganz dunklen Gesichtsfelde vorkommen, wo sie natürlich nach derselben Regel localisirt werden. Wenn sie hier auch nicht mit wahrnehmbaren Bildern wirklich gesehener äusserer Gegenstände zusammenfallen, so ist doch für jede Stelle der Netzhaut durch Erfahrung die Richtung schon bekannt, in welcher gesehene Objecte liegen müssten, die sich auf ihr abbilden, mit welchen alsdann das subjective Phänomen zusammenfallen würde. Dass auch im dunklen Felde die subjectiven Erscheinungen, Nachbilder zum Beispiel, nach demselben Gesetze wie die Eindrücke wirklich gesehener Objecte localisirt werden, zeigt sich empirisch dann, wenn wir das dunkle Gesichtsfeld, ohne das Auge zu bewegen, plötzlich hell machen; so sehen wir auch das Nachbild, und zwar ohne dass es seinen Platz veränderte, nunmehr mit bestimmten Objecten vor uns zusammenfallen und diese decken. Da es beim Uebergang von Dunkel zu Hell seinen Platz nicht änderte, so war es also schon vorher so localisirt, wie die äusseren Objecte, mit denen es schliesslich zusammenfiel.

Diese Betrachtungen lassen wohl über die Richtigkeit unseres Gesetzes keinen Zweifel, wonach jeder Eindruck auf die Netzhaut genau in denjenigen Theil des Gesichtsfeldes verlegt wird, wo ein äusseres Object erscheinen würde, welches passend gelegen ist, um bei geradlinigem Einfall des Lichtes in das Auge denselben Eindruck auf die Netzhaut zu machen.

Das Gesetz lässt sich auch durch directere Versuche erweisen, aber freilich nicht mit sehr grosser Schärfe. Wir wissen, dass ein rechts gelegenes leuchtendes Object auf der linken Seite der Netzhaut abgebildet wird, ein links gelegenes auf der rechten, ein oben liegendes unten, ein unten liegendes oben. Bei Leuten mit dünnen und durchscheinenden Augenhäuten können wir das optische Bild eines sehr hellen Lichtes, ja sogar an den angegebenen Stellen durch die Sclerotica scheinen sehen (S. 65). Wenn wir nun die rechte Seite

des Auges mit dem Nagel drücken, sehen wir das Druckbild links (S. 196). Wenn wir durch eine Brennlinse starkes Licht aussen auf die rechte Seite der Sclera auffallen lassen, erscheint uns links im Gesichtsfelde eine entsprechende Lichterscheinung. Wenn wir an der genannten Stelle einen absteigenden elektrischen Strom aus dem Auge austreten lassen, erscheint uns ebenfalls links der entsprechende helle Fleck.

Wenn wir das Auge dagegen links reizen, haben wir die subjective Erscheinung rechts im Gesichtsfelde, wenn wir unten reizen, haben wir sie oben, wenn oben, unten.

Die optischen Täuschungen, welche auf diesem Principe beruhen, sind sehr zahlreich. Wir können sie in folgende Hauptklassen eintheilen:

1) Die Lichtstrahlen des Objects sind, ehe sie in das Auge treffen, von ihrem Wege abgelenkt worden durch Reflection, Refraction oder Diffraction. Wenn das Licht nach der Veränderung seines Weges homocentrisch bleibt, so glauben wir im Allgemeinen, mit Vorbehalt der beschriebenen Urtheilstäuschungen, das Object an derjenigen Stelle des Raumes zu sehen, wo der Durchschnittspunkt der in das Auge eintretenden (nöthigenfalls rückwärts verlängerten) Strahlen liegt. Wir nennen diesen Durchschnittspunkt deshalb das optische Bild des Objectes (S. 37). Von dieser Art sind die optischen Wirkungen unserer dioptrischen und katoptrischen Fernröhre und Mikroskope, unserer ebenen und kugelig gekrümmten Spiegel, der Loupen und anderer Glaslinsen, so wie auch der Prismen, wenn sie so angewendet werden, dass sie merklich homocentrisches Licht geben. Ich brauche hier auf die Wirkung dieser Instrumente nicht näher einzugehen, da die Lehre davon einen breit und sorgfältig ausgebildeten Zweig der physikalischen Optik bildet. Alle diese Instrumente entwerfen optische Bilder der Objecte, welche wir statt der letzteren zu sehen glauben, sie bringen also optische Täuschungen hervor, aber solche, deren Irrthum wir leicht zu vermeiden wissen, während wir im Stande sind an den vergrösserten oder sonst veränderten optischen Bildern mancherlei zu erkennen, was wir bei directer Betrachtung des Objects nicht erkennen können. Ein ebener Spiegel lässt uns die Objecte von einem Standpunkte aus sehen, den wir in Wirklichkeit oft nicht einnehmen können, nämlich vom Standpunkte eines hinter der Spiegelebene befindlichen Beobachters, der z. B. unser eigenes Gesicht von vorn erblickt, was wir direct nicht können. Ein Prisma trennt uns die Bilder eines lichten Objects, welche den verschiedenen einfachen Farben seines Lichts entsprechen, und so fort.

Wenn bei der Veränderung des Weges das Licht nicht homocentrisch bleibt, erblicken wir dagegen mehr oder weniger verwaschene lichte Stellen in denjenigen Theilen des Gesichtsfeldes, welche den beleuchteten Stellen der Netzhaut entsprechen. Von dieser Art sind die Erscheinungen des Regenbogens, die Diffractionsfransen, das Glitzern bewegten Wassers und so weiter.

2) Das Licht fällt geradlinig in das Auge, letzteres ist aber nicht für den leuchtenden Punkt accommodirt. Ist die Pupille frei, so erscheinen in einem solchen Falle im Gesichtsfelde statt leuchtender Punkte leuchtende Flächen mehr oder weniger unregelmässig gebildet in Form der be-

kannten strahligen Figur kleiner Zerstreuungskreise (S. 138); kleinere Objecte, wie die Mondsichel, erscheinen sehr gewöhnlich als doppelt oder mehrfach (S. 139). Es sind diese Erscheinungen bedingt dadurch, dass das Licht eines Punktes des Objects nicht mehr auf einen einzelnen Punkt der Netzhaut concentrirt wird, sondern sich über eine kleine Fläche derselben zerstreut. Der beleuchteten Netzhautfläche entsprechend wird eine flächenhaft ausgebreitete Lichterscheinung im Gesichtsfelde gesehen.

Wenn nicht die ganze Pupille frei ist, sondern man durch ein Kartenblatt mit einer engen Oeffnung blickt, so erscheinen die Objecte auch in falscher Richtung und Grösse; bewegt man das Kartenblatt, so bewegt sich auch scheinbar der Gegenstand, wie dies auf S. 95 und 96 erklärt ist. Hier hat allerdings jeder helle Punkt des Objects ein fast punktförmiges Bild auf der Netzhaut, aber dieses hat wegen der mangelhaften Accommodation des Auges nicht seine normale Lage.

Wenn man durch Kartenblätter mit zwei oder drei Oeffnungen sieht, erblickt man bei mangelhafter Accommodation die Objecte verdoppelt oder verdreifacht.

Diese Versuche sind wichtig, weil sie erkennen lassen, dass auch die genaue Accommodation des Auges mit zu den Bedingungen des normalen Sehens gehört, auf welches sich die Einübung bei der Localisation der Sinneseindrücke bezieht. Wir projiciren die Zerstreuungskreise oder die Theile der Zerstreuungskreise, welche beim Sehen durch enge Oeffnungen stehen bleiben, so in das Gesichtsfeld, als wären es Bilder, die bei genauer Accommodation gebildet wären. Für jeden beleuchteten Punkt der Netzhaut setzen wir auch dabei wieder einen lichten Punkt in das Gesichtsfeld. Es haben auch diese Versuche bei der Entwickelung der physiologischen Optik einige Wichtigkeit gehabt, weil sie erkennen liessen, dass nicht die Richtung, in welcher ein Lichtstrahl in das Auge gelangt, noch die Richtung, in welcher er die Netzhaut trifft, sondern nur der Ort der Netzhaut, welcher getroffen wird, die Richtung der Projection bestimmen. Betrachtet man *Fig. 50* auf S. 96, so weichen hier die Projectionslinien $f\varphi$ und $g\gamma$ wesentlich von den wirklichen Richtungen der gebrochenen und ungebrochenen Strahlen ab.

3) Es erscheinen körperliche Objecte aus dem Auge selbst, wie die entoptischen Objecte, fliegenden Mücken, Gefässschatten, Netzhautgrube u. s. w., wie sie im 15. und zum Theil im 25. Paragraphen beschrieben sind. Diese beschatten die hintere Schicht der Netzhaut und erscheinen deshalb im Gesichtsfelde selbst als Schatten. Die optische Täuschung versetzt hierbei also Gegenstände, die im Auge liegen, nach aussen und zwar meistentheils in verkehrter Lage, da gewöhnlich der Schatten des Objects auf der Netzhaut aufrecht stehend ist. Da die Lage dieser Gebilde sich nur durch ihre subjective Erscheinung bestimmen lässt, so lehren sie für die Theorie nichts Neues.

4) Die Nerven werden gereizt, oder ihre Erregungsstärke wird verändert. In diesen Fällen ist nicht das Licht selbst, sondern die Lichtempfindung verändert; hierher gehören die Druckbilder, das Accommodationsphosphen, die leuchtenden Garben an der Eintrittsstelle des Sehnerven bei Be-

wegung des Auges, das Eigenlicht der Netzhaut, die elektrischen Erscheinungen, wie sie im 17. Paragraphen beschrieben sind. Bei dieser letzten Klasse von Erscheinungen besteht die Täuschung nicht mehr allein in einer falschen Localisation eines leuchtenden oder dunklen Objects. Es ist vielmehr gar kein solches vorhanden, sondern nur die Empfindung, welche der Regel nach durch solche Objecte hervorgebracht zu werden pflegt.

Bei gesunden Menschen im wachen Zustande treten alle diese täuschenden Erscheinungen, welche wir beschrieben haben, im Gesichtsfelde wohl ein, und lassen sich nicht einmal beseitigen durch die bessere Einsicht, wodurch sie als Täuschungen anerkannt werden. Indessen ist diese bessere Einsicht in der Regel vorhanden, die Täuschung ist als Täuschung anerkannt. Wenn wir durch ein optisches Instrument oder in einen Spiegel sehen, so wissen wir, dass wir unter abgeänderten Bedingungen sehen, und lernen bald die richtigen Urtheile über die wirkliche Beschaffenheit der Gegenstände mittelst des falschen Bildes fällen. Wir lernen zum Beispiel nach dem Anblick des Spiegelbildes uns rasiren, kämmen u. s. w., trotzdem dieses Bild überall rechts und links verkehrt zeigt. Wir lernen nach einiger Uebung mit Nadeln unter der Loupe oder selbst unter dem zusammengesetzten Mikroskope zu präpariren, obgleich beide Instrumente jede Bewegung unserer Hand in übertriebener Grösse, das letztere auch in verkehrter Richtung zeigen, so dass wir also sogar eine neue Einübung unserer Bewegungen nach falschen optischen Bildern ausbilden können.

Bei den übrigen Erscheinungen, welche in dem Auge selbst ihren Grund finden, scheint es namentlich der Umstand, dass die subjectiven Phänomene sich mit dem Auge bewegen, zu sein, welcher sie als subjectiv erkennen lässt. Bei schnell aufblitzenden Erscheinungen der Art, welche ebenso schnell wieder verschwunden sind, fällt dieses Merkmal fort, und da kann man in der That oft zweifelhaft sein, ob man etwas Wirkliches gesehen habe. Wenn man zum Beispiel im Finsteren seinen Weg sucht und im indirecten Sehen bei einer Bewegung des Körpers und Auges seitlich ein Lichtschein aufblitzt, ist mitunter der bestunterrichtete Beobachter ausser Stande bestimmt zu sagen, ob ein solcher objectiv oder subjectiv war. Dass manche Gespenstergeschichten durch solche subjective Erscheinungen hervorgerufen sind, ist sehr wahrscheinlich. Das Eigenlicht der Netzhaut ist reich an Gestaltungen, denen von einem furchtsamen Menschen leicht allerlei wunderliche Deutungen untergeschoben werden können, namentlich wenn er das Auge starr auf die gefürchtete Erscheinung richtet und daher nicht bemerken kann, dass sie sich mit dem Auge bewegt. In Fiebern und Gehirnkrankheiten, wo die regelrechte Verbindung der Vorstellungen gestört ist, die einzelnen nicht fest gehalten, verglichen und combinirt werden können, fehlt dann auch die zur Anerkennung der subjectiven Natur der genannten optischen Erscheinungen nöthige Ueberlegung, und es knüpfen sich daran häufig phantastische Vorstellungen. Im Säuferwahnsinn sind schwarze Flecke im Gesichtsfelde, welche sich mit dem Auge schnell umherbewegen; diese erwecken die Vorstellung von herumlaufenden Mäusen, schwarzen Käfern oder Fliegen. In Fieberphantasien erkennt man aus den Beschreibungen der Kranken dagegen oft die lichten und farbigen Punkte

und Kreise wieder, welche bei leichtem Druck auf das Auge auch bei Gesunden hervorgebracht werden können und bald für Feuerfunken, bald für feurige Augen u. s. w. gelten.

Bei den bisher beschriebenen Erscheinungen ist von uns immer angenommen worden, dass der Kopf aufrechte Haltung habe, oder wenn nicht, dass wir eine richtige Kenntniss seiner Neigung haben. Schliesslich ist noch eine Täuschung zu erwähnen, welche von einer falschen Schätzung der Richtung der Kopfes herrührt. AUBERT [1] brachte in einem Fensterausschnitt eines übrigens verdunkelten Zimmers einen Spalt von 5 Centimeter Länge und 2 Centimeter Breite an, der den einzigen hellen und sichtbaren Gegenstand in dem umgebenden Raume bildete. War diese helle Linie vertical und neigte er den Kopf nach rechts, so dass das rechte Ohr sich nach unten richtete, so erschien die Linie geneigt von rechts unten nach links oben. Neigung des Kopfes nach links gab die entgegengesetzte Scheinverschiebung der Linie. War die Linie unter 45 Grad gegen den Horizont geneigt und verlief von links unten nach rechts oben, so erschien sie bei der Neigung des Kopfes nach rechts vertical, ja über die Verticale hinaus nach entgegengesetzter Richtung gedreht. Bei der Neigung nach links erschien sie horizontal, ja über die Horizontale hinausgedreht. Das Maximum der Drehung der hellen Linie trat ein, wenn der Kopf um etwa 135° geneigt war.

Die Drehung der hellen Linie folgt der Neigung des Kopfes, wenn diese langsam ausgeführt wird, ziemlich unmittelbar; neigt man aber den Kopf plötzlich bedeutend, so vergehen einige Secunden, bevor die Linie die Drehung vollendet.

Wenn man bei unverändert schiefer Haltung des Kopfes das Zimmer beleuchten lässt, so erscheint die verticale Linie wieder vertical. Lässt man das Licht auslöschen, so geht sie in ihre frühere Neigung zurück.

Wir haben es hierbei nicht zu thun mit einer wirklichen Drehung des Auges im Kopfe, wie man sich mit Hilfe von Nachbildern überzeugen kann. Ein im verticalen Meridian des Auges entwickeltes Nachbild scheint bei einer Drehung des Kopfes um einen rechten Winkel nach rechts im dunklen Zimmer nicht horizontal zu liegen, wie es wirklich liegt, sondern schräg von links unten nach rechts oben, und eine objective helle Linie, welche wirklich diese letztere Neigung hat, erscheint vertical.

Die Täuschung beruht vielmehr darauf, dass wir im Dunkeln die Seitenneigung unseres Kopfes für kleiner halten, als sie wirklich ist.

Statt im dunklen Zimmer zu beobachten, kann man die Linie auch an einer einförmig angestrichenen Wand anbringen und vor das Gesicht einen cylindrischen Schirm anbringen, der den Anblick aller seitwärts gelegenen Gegenstände verhindert.

Es gehören hierher ferner die bekannten Erscheinungen über die Scheinbewegung der gesehenen Gegenstände, wenn unser Körper selbst auf einem Nachen oder in einem langsam und leise vorwärts bewegten Eisenbahnwagen in Bewegung ist, oder umgekehrt die täuschende Erscheinung einer eigenen

---

[1] VIRCHOW Archiv für pathologische Anatomie und Phys. Bd. XX.

scheinbaren Bewegung, wenn wir selbst zwar ruhig sitzen, aber die vor uns befindlichen Gegenstände mit constanter Geschwindigkeit bewegt sind. Das grösste Beispiel der ersteren Art ist die scheinbare Ruhe der Erde und die scheinbare Bewegung des Sternenhimmels. Zweifel entstehen oft, wenn auf einer Station zwei Eisenbahnzüge neben einander halten, in deren einem sich der Beobachter befindet und den andern betrachtet. Wenn dann einer von beiden sich in Bewegung setzt, ist es oft schwer zu ermitteln, ob dies der eigene oder der andere ist, wenn es nicht gelingt feststehende Theile des Erdbodens oder der Gebäude zu sehen. Auch in Sternwarten mit drehbarem Kuppeldach, wie solche für die Aufstellung des Heliometers gebraucht werden, tritt bei der Drehung des Daches wohl die Täuschung ein, dass sich der Fussboden drehe und das Dach still stehe.

Im Allgemeinen hält man dabei gewöhnlich den grösseren Theil des gesehenen Gesichtsfeldes für ruhend, den kleineren für bewegt. Dann kommt aber hinzu, dass wir beim Anfange einer Bewegung Stösse oder Erschütterungen unseres Körpers oder wenigstens Wirkungen der Trägheit seiner schweren Masse zu fühlen erwarten. Wenn nun die Bewegung sehr leise beginnt, wie die eines Nachens, so glauben wir nicht uns in Bewegung zu befinden, oder wenn wir Stösse gefühlt haben, wie von einem dicht daneben fahrenden Eisenbahnzuge, die sich auf den stehenden übertragen, so glauben wir bewegt zu sein. Wenn die eine oder andere Deutung gleich möglich ist, kann der Beobachter auch willkührlich die eine oder andere Anschauung in sich erzeugen.

Für die Beobachtung des Gesichtschwindels, der durch eine angeschaute Bewegung entsteht und den Herr J. J. Oppel an strömendem Wasser (dem Rhein bei Schaffhausen kurz vor dem Falle) bemerkt hatte, hat derselbe einen Apparat construirt, den er Antirrheoskop nennt und mit dem man die Erscheinung jederzeit beobachten kann. Derselbe besteht aus fünf parallel neben einander liegenden Walzen von $2\frac{1}{2}$ Zoll Durchmesser und $2\frac{1}{2}$ Fuss Länge, welche durch eine grössere Rolle alle nach derselben Richtung in Umdrehung gesetzt werden können. Jede Walze ist mit weissem Papier überzogen, auf dem je zwei schwarze Spiralen von je $2\frac{1}{2}$ Windungen gezeichnet sind. Jede Spirale besteht wiederum aus einem breiten mittleren schwarzen Streifen von $1\frac{1}{2}$ Zoll Breite, neben dem in einer Entfernung von je einem halben Zoll zwei schmälere schwarze Streifen von einem halben Zoll Breite hergehen. Das weisse Band zwischen dem schwarzen Streifen der einen und der nächstbenachbarten Spiralwindung hat dann wieder $1\frac{1}{2}$ Zoll Breite, so dass Weiss und Schwarz symmetrisch vertheilt sind. Wird nun die grössere Scheibe, deren Rand mit Reibung an den Enden der Walzen schleift, gedreht, so drehen sich alle Walzen in gleichem Sinne, die mittleren mit etwas grösserer Geschwindigkeit als die äusseren, um die ungleiche Bewegung des Wassers im Flusse nachzuahmen. Die Spiralbänder scheinen dann mit gleichförmiger Geschwindigkeit sich der Länge der Walzen parallel zu verschieben, und wenn der Beobachter eine Zeit lang auf die scheinbar bewegten Bänder hingeblickt hat und nun auf ruhige Objecte sieht, scheinen diese rückwärts zu gehen.

Herr Oppel hat vor den Walzen auch noch ein Gesichtszeichen befestigt, um den Blick fixirt zu halten. Da aber bei fester Fixation dieses Zeichens, wie es scheint, der Versuch ihm oft misslungen ist, und er glaubte, dass feste Fixation zur Erzeugung des Schwindels nöthig und dass die feste Fixation nur durch den Anblick der bewegten Masse gehindert sei, so hat er als Fixationszeichen ein rautenförmiges Holztäfelchen von $\frac{1}{2}$ Zoll Breite und $\frac{3}{4}$ Zoll Höhe angewendet, welches selbst langsam durch die Mechanik des Instruments gedreht wurde und dem Beschauer bald die eine, bald die andere Seite zukehrte. Hiermit gelangen die Versuche, weil, wie ich selbst meine, durch diese Einrichtung dauernde feste Fixation ein

und desselben festen Punktes unmöglich gemacht war, da jeder Punkt des Holztäfelchens, den man etwa hätte fixiren wollen, abwechselnd schwand und wieder zum Vorschein kam. Ich selbst muss nach meinen Versuchen gerade das Entgegengesetzte von Oppel behaupten, nämlich, dass bei ganz strenger Fixirung des Blicks der Schwindel nicht zu Stande kommt, sondern nur durch die unwillkührlichen und meist unbewussten kleinen Bewegungen, mittels deren wir den bewegten Körpern folgen. Darin aber hat Oppel Recht, dass grössere willkührliche Bewegungen des Auges, mit denen wir bewusster Weise eine längere Strecke hindurch dem bewegten Körper folgen, der Täuschung hinderlich sind.

Dass man die Objecte aufrecht sieht, ohngeachtet ihre Netzhautbilder verkehrt sind, schrieb Kepler [1] der Seele zu, welche den Eindruck auf einen untern Theil der Netzhaut sich so vorstellen soll, als wenn er von den Strahlen eines höheren Punktes der Sache entstände. Ebenso Scheiner [2]. Priestley [3] leitet diese Eigenthümlichkeit der Gesichtsvorstellungen aus der Vergleichung mit dem Tastsinn her. Descartes [4] erläutert die natürliche Methode, die Grösse, Lage und Entfernung der Gegenstände aus der Richtung der Augenaxen zu beurtheilen, indem er sie vergleicht mit der Art, wie ein Blinder von der Grösse und Entfernung einer Sache vermittels zweier Stäbe, selbst von unbekannter Länge, urtheilt, wenn seine Hände, worin er die Stäbe hält, in einer bekannten Entfernung und Lage gegen einander sind. Uebrigens veranlasste die Frage wegen des Aufrechtsehens der Objecte eine grosse Menge von Schriften [5].

Kepler [6] fand auch schon die richtige Regel für die scheinbare Lage der durch brechende oder spiegelnde Instrumente gesehenen Objecte, indem er sie in den Convergenzpunkt der in das Auge tretenden Strahlen verlegte. Die Schwierigkeiten, welche später zu vielfachen Discussionen über diesen Punkt führten, betrafen nicht sowohl die Richtung, in der das Object gesehen wurde, als vielmehr seine Entfernung, wovon im folgenden Abschnitt zu sprechen sein wird.

Porterfield [7] glaubte, dass wir vermöge einer ursprünglichen Einrichtung unserer Natur die Gegenstände irgendwo in der geraden Linie sehen, die senkrecht auf die Netzhaut an der Stelle, wohin das Bild fällt, gezogen wird. Dieselbe Annahme wurde auch von d'Alembert [8], Bartels [9] und vielen Anderen festgehalten. Volkmann [10] hat für die Normalen der Netzhaut die Richtungslinien gesetzt, welches nach der auf S. 69 gegebenen Definition die durch das Netzhautbild und den (hintern) Knotenpunkt des Auges gezogenen Linien sind. Diese Linien sind in der That die richtigen, um objectiv bei physikalischen Untersuchungen den leuchtenden Punkt zu finden, wenn der Ort des Netzhautbildes in dem gut accommodirten Auge und dessen Stellung vollständig gegeben sind. So spielen also die Richtungslinien eine wichtige Rolle in der physiologischen Optik, namentlich, wo es sich darum handelt, zu ermitteln, mit den Bildern welcher äusseren Objecte irgend welche Erregungen der Netzhaut durch Licht oder durch innere Reize sich decken. So weit wir also den Ort der gesehenen Gegenstände objectiv richtig beurtheilen, so weit ist Volkmann's Darstellungsweise im Recht. Eine solche richtige Beurtheilung trifft aber fast nur zu für die direct mit beiden Augen gesehenen Punkte und selbst für diese nicht immer. Alle indirect gesehenen Punkte verlegen wir in falsche Richtungen, indem wir den Winkel zwischen ihrer Richtungslinie und der Blicklinie zu klein nehmen, wie der vorige Paragraph gelehrt hat, und so oft wir die Augen convergiren lassen und auf nähere Objecte richten, beurtheilen wir die Richtungen der gesehenen Objecte falsch, wie die oben beschriebenen Versuche lehren. Eine Hauptschwierigkeit der Theorie von Volkmann ist die Erklärung der binocularen Doppelbilder,

---

1 Paralipomena p. 169. – Smith *Opticks. Rem.* p. 4.

2 Oculus p. 192.

3 Geschichte der Optik, übersetzt von Klügel, Leipzig 1776, S. 69.

4 Dioptrice p. 68 und De homine p. 66.

5 Kaestner im Hamburger Magazin VIII, St. 4, Art. 8—IX, St. 1, Art. 4. — Lichtenberg in Erxleben's Naturlehre, 6. Aufl., S. 328. — Rudolphi Physiologie II, 227. — L. Fick in Müller's Archiv für Anatomie 1854, S. 220. — Noch andere unten im Literaturverzeichniss.

6 Paralipomena p. 285 und p. 69—70.

7 *On the eye* II, 285.

8 Opuscula mathem. I, p. 26.

9 Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes, Berlin 1834.

10 Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes, Leipzig 1836, und Artikel Sehen in R. Wagner's Handwörterbuch der Physiologie. — S. auch Mile über Richtungslinien des Sehens, Poggendorff's Annalen XLII, 245, und Müller's Archiv für Anatomie 1838, S. 387.

wie Hering [1] richtig bemerkt hat. Wir können also die Theorie von Volkmann nicht als ein angeborenes und elementares Gesetz auffassen, welches an und für sich schon die Richtung des Gesehenen bestimmte. Ein wesentliches Verdienst Hering's ist es, den Einfluss der Convergenzstellungen hierbei in das Licht gestellt zu haben.

Den Einfluss der Schwindelbewegungen und Scheinbewegungen haben untersucht Plateau [2], Oppel [3] und Zoellner [4]; den Einfluss falscher Beurtheilung der Kopfstellung Aubert [5]; über den Einfluss der Lähmung einzelner Muskeln A. v. Graefe [6] und Nagel [7].

1604. Kepler ad Vitellionem Paralipomena p. 169; 285; 69—70.
1619. Scheiner Oculus, Oenipontii 1619, p. 192.
1637. Descartes Dioptrice. Leyden. p. 68.
1667. Honoratus Fabri Synopsis optica. Lugd.
1709. Berkeley *Essay towards a new theory of vision.*
1740. Le Cat *Traité des sens.* Rouen.
— Wedel über den Radius visorius des Honoratus Faber in Halleri Disputat. anat. IV, 216.
1754. Condillac *Traité des sensations.*
1759. Porterfield *a treatise on the eye.* Edinb. Vol. II, p. 285.
1761. d'Alembert Opuscula mathem. I, p. 26; 265.
1771. Boehm de Visione erecta. Acta Hassiaca. 64.
1772. Priestley *History and present state of discoveries relating to vision, light and colours.* Uebers. v. Klügel. Leipzig 1775, p. 69.
1783. Rochon im *Recueil de Mémoires sur la Mécanique et Physique.* VI, p. 241.
1784. Du Tour *Mémoire pour établir que le point visible est vu dans le rayon qui va de ce point à l'oeil. Mémoires de savans étrang.* Paris. VI, p. 241.
— Fearn *a rationale of the laws of cerebral vision, composing the laws of single and erect vision, deduced upon the Principle of Dioptrics.* London.
1788. Walter Berliner deutsche Abhdl. 3.
1793. Araldi *Esame di uno fra i diversi dubbi messi dal celebre* d'Alembert *ai principi dell' Ottica; con alcune considerazioni sopra la teorica psicologica della visione. Memor. dell' Istit. nazion. Ital.* I, p. 451.
1794. Lichtenberg in Erxleben's Naturlehre. 6. Aufl. S. 328.
— Kaestner im Hamburger Magazin VIII, St. 4, Art. 8; IX, St. 1, Art. 4.
1820. Rudolphi Physiologie II, 227.
1826. J. Müller zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig.
1834. Bartels Beiträge zur Physiologie des Gesichtsinns. Berlin.
1836. Volkmann Beiträge zur Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig. Auch in R. Wagner's Handwörterbuch der Physiologie. Artikel: Sehen.
1837. Mile über Richtungslinien des Sehens. Poggend. Ann. XLII, 245; und in J. Müller's Anat. u. Physiol. 1838, S. 387.
1844. D. Brewster *Law of visible position in single and binocular vision. Edinb. Trans.* XV, 1844.
1849. Plateau *sur de nouvelles applications curieuses de la persistance des impressions de la rétine. Bull. de Bruxelles* XVI, II, 30, 254. *Institut* XVIII, No. 835, p. 5. *Phil. Magaz.* XXXVI, 434, 436. Poggend. Ann. LXXX, 150, 287.
1852. H. Boens *Étude sur la vision de l'homme et des animaux. Bull. de Bruxelles* XIX, 2, p. 155—161. (*Cl. des sciences*, 1852, p. 443—449.)
— Lotze Medizinische Psychologie, S. 362—369.
1854. L. Fick Bemerkungen zur Physiologie des Sehens. Müller Archiv für Anat. und Physiol. 1854, S. 220—225.
— A. v. Graefe Beiträge zur Physiologie und Pathologie der schiefen Augenmuskeln. Archiv für Ophthalmol. I, 1, S. 67.
1855. H. Helmholtz über das Sehen des Menschen, ein populär wissenschaftlicher Vortrag. Leipzig. S. 20—42.
— E. B. Hunt *On our sense of the vertical and horizontal. Silliman J.* (2) XX, 368—375.

---

[1] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1861. S. 35—64.
[2] *Bulletin de Bruxelles* T. XVI. — Poggendorff's Annalen LXXX, S. 287.
[3] Poggendorff's Annalen XCIX, 543.
[4] Ebenda CX, 500.
[5] Virchow's Archiv für pathologische Anatomie XX, 381—393.
[6] Archiv für Ophthalmologie I, 1, S. 67.
[7] Das Sehen mit zwei Augen. Breslau 1861. S. 124—129.

1856. J. J. Oppel Neue Beobachtungen und Versuche über eine eigenthümliche, noch wenig bekannte Reactionsthätigkeit des menschlichen Auges. Poggend. Ann. XCIX, 540—561.
1858. Ueberweg zur Theorie der Richtung des Sehens. Zeitschr. für ration. Medicin. (3) Bd. V, 268—282.
1860. J. J. Oppel zur Theorie einer eigenthümlichen Reactionsthätigkeit des menschlichen Auges in Bezug auf bewegte Netzhautbilder. Jahresber. d. Frankfurter Vereins, 1859—1860, 54—64; Zeitschr. für Naturw. XVII, 258—260.
— H. Aubert eine scheinbare bedeutende Drehung von Objecten bei Neigung des Kopfes nach rechts und links. Virchow Archiv XX, 381—393.
1861. Nagel das Sehen mit zwei Augen. Breslau. S. 124—129.
— E. Hering Beiträge zur Physiologie. Leipzig. Heft 1, S. 35—64.
1862. F. Zöllner über eine neue Art anorthoskopischer Zerrbilder. Poggend. Ann. CXVII, 477—484; Zeitschr. für Naturw. XXI, 163.
1863. J. Czermak über das sogenannte Problem des Aufrechtsehens. Wiener Ber. XVII, 566—574.
1865. Alfred Graefe über einige Verhältnisse des Binocularsehens bei Schielenden. Archiv für Ophthalmologie XI, 2, S. 6—16.

§. 30. Wahrnehmung der Tiefendimension.

Wir haben in den beiden vorangehenden Paragraphen beschrieben, wie sich die gesehenen Objecte in der Fläche des Sehfeldes scheinbar neben einander ordnen, und welche Momente auf die Art dieser Anordnung, die scheinbaren Abstände der einzelnen Objecte im Sehfelde Einfluss haben. Wir haben dabei allerdings zur Erleichterung der geometrischen Auffassung uns erlaubt für das Sehfeld die Gestalt einer Kugel anzunehmen, aber dabei ausdrücklich hervorgehoben, dass die scheinbare Anordnung im Sehfelde überhaupt eben nur eine flächenhafte Anordnung, nach zwei Dimensionen ausgedehnt, sei, aber keineswegs eine Anordnung auf irgend einer bestimmten Fläche, die ihre feste Lage und Grösse hätte. Die Form dieser Fläche des Sehfeldes blieb vielmehr vollständig unbestimmt. Eben deshalb kann sie aber nun noch jede beliebige Form annehmen, so bald irgend welche neue Momente der Wahrnehmung hinzutreten, die über eine solche Aufschluss geben.

Das einäugige Sehen giebt zunächst nur die Wahrnehmung der Richtung, in der der gesehene Punkt liegt. Dieser kann sich in der Visirlinie, in der er liegt, hin und her bewegen, ohne dass in dem Eindruck auf das Auge sich etwas ändert mit Ausnahme der Grösse des Zerstreuungskreises, den er auf der Netzhaut erzeugt; und so lange die Verschiebung die Länge von Czermak's Accommodationslinie (s. S. 92) nicht überschreitet, wird diese Veränderung des Zerstreuungskreises gar keine wahrnehmbare Grösse haben. Welche Fehler wir in der Wahrnehmung der Richtung einer solchen Visirlinie begehen, ist im vorigen Paragraphen auseinandergesetzt worden. Das einäugige Sehen giebt uns also zunächst weiter nichts als die scheinbare Richtung der Visirlinie, in der der gesehene Punkt zu suchen ist.

Um nun eine vollständige Kenntniss der wirklichen Vertheilung der gesehenen Objecte im Raume zu erhalten, ist es weiter noch nöthig, in der genannten Visirlinie auch den Abstand jedes gesehenen Punktes vom Auge zu kennen. Zur Kenntniss der Flächendimensionen des Feldes muss auch noch die Kenntniss seiner Tiefendimension kommen. Die tägliche Erfahrung lehrt uns, dass wir auch diese Tiefendimensionen beurtheilen, bald mehr, bald

weniger genau. Wir haben also zu untersuchen, auf welche Weise wir zur Kenntniss der Abstände der gesehenen Objecte von unserem Auge kommen.

Hierbei sind zweierlei Hilfsmittel zu trennen, die einen gehören der Erfahrung über die besondere Natur der gesehenen Objecte an und geben also nur Vorstellungen des Abstandes, die andern gehören der Empfindung an und geben eine wirkliche Wahrnehmung des Abstandes. Zu diesen letzteren gehören: 1) das Gefühl der nothwendigen Accommodationsanstrengung, 2) die Beobachtung bei bewegtem Kopf und Körper, 3) der gleichzeitige Gebrauch beider Augen.

Ehe wir untersuchen, wann und wieviel diese letztgenannten Hilfsmittel der Wahrnehmung leisten, wird es nöthig sein die aus der Erfahrung genommenen Momente zu untersuchen, um abscheiden zu können, was diesen angehört. Diesen gehört alles an, was wir zu unterscheiden wissen in Bezug auf die Tiefendimensionen des Gesichtsfeldes mit einem Auge, bei unbewegtem Kopfe, an Gegenständen, die weit genug entfernt oder so verwaschen gezeichnet sind, dass keine deutlich fühlbare Accommodationsanstrengung für ihre Betrachtung stattfindet. Es kommt hierbei in Betracht erstens die mitgebrachte Kenntniss der Grösse der gesehenen Objecte, dann die ihrer Form, ferner die Vertheilung des Schattens, endlich die Trübung der vor ihnen liegenden Luft.

Derselbe Gegenstand aus verschiedener Entfernung gesehen giebt verschieden grosse Netzhautbilder und erscheint unter verschiedenen Gesichtswinkeln. Je entfernter er ist, desto kleiner der Gesichtswinkel, unter dem er erscheint. Wie also die Astronomen aus der Messung der wechselnden Gesichtswinkel, unter denen uns Sonne und Mond erscheinen, die Aenderungen in der Entfernung dieser Gestirne berechnen können, so können wir aus dem Gesichtswinkel, oder was dem entspricht, aus der Grösse des Netzhautbildchens eines gesehenen Gegenstandes von bekannter Grösse, eines Menschen zum Beispiel, die Entfernung schätzen, in der er sich von uns befindet. Es sind namentlich Menschen und Hausthiere, welche in dieser Beziehung werthvolle Merkzeichen in der Landschaft bilden, weil sie durch ihre Bewegung leicht erkennbar sind, nur wenig in der Grösse wechseln und ihre Grösse uns sehr gut bekannt ist. Namentlich Militärs pflegen gut geübt zu sein, auf den Abstand entfernter Truppenmassen auf unbekanntem Terrain in dieser Weise richtig zu schliessen, so wie man denn auch zu militärischen Zwecken verschiedene kleine optische Apparate eingerichtet hat, mit denen man den Gesichtswinkel für die Höhe eines entfernten Mannes messen und danach seine Entfernung ablesen kann. Häuser, Bäume und Culturpflanzen dienen demselben Zwecke weniger sicher, wegen ihrer weniger constanten Grösse, wobei denn auch gelegentlich starke Irrthümer unterlaufen. Ein Bewohner der Ebene hält Weinberge leicht für Kartoffelfelder, oder Tannen auf fernen hohen Bergen für Heidekraut, und schätzt danach die Entfernungen und Grössen der Berge zu klein. Aus derselben Rücksicht brauchen die Maler Staffage von Menschen und Vieh in Landschaften, um die Grösse der dargestellten Dinge einigermassen kenntlich zu machen.

Damit hängt nun auch noch zusammen, dass dieselben Objecte, wie der Mond oder ferne Berge, wenn wir sie wegen trüberer Luft oder aus anderen

Gründen für ferner halten, uns gleichzeitig auch immer in demselben Maasse an Grösse zu wachsen scheinen. Ferner die Erfahrung, dass ferne Theile der Landschaft, durch ein vergrösserndes Fernrohr gesehen, dem Beschauer in der Regel nicht vergrössert sondern nur genähert erscheinen, und er sich erst durch Oeffnung des andern Auges davon überzeugen muss, dass die Bilder auch vergrössert sind.

Da übrigens diese Beziehung zwischen Entfernung und Grösse erst durch lange Erfahrung erlernt werden muss, wird es nicht auffallen können, dass Kinder hierin ziemlich ungeübt sind und leicht grobe Irrthümer machen. Ich selbst entsinne mich noch, dass ich als Kind an einem Kirchthurm (der Garnisonskirche zu Potsdam) vorübergegangen bin und auf dessen Gallerie Menschen sah, die ich für Püppchen hielt, und dass ich meine Mutter bat sie mir herunterzulangen, was, wie ich damals glaubte, sie können würde, wenn sie den Arm ausstreckte. Der Zug hat sich meinem Gedächtnisse eingeprägt, weil mir an meinem Irrthum das Gesetz der perspectivischen Verkleinerung deutlich wurde.

Zur Kenntniss der Grösse kommt ferner in sehr vielen Fällen die Kenntniss der Form der gesehenen Objecte, namentlich in solchen Fällen, wo das eine zum Theil vom andern gedeckt wird. Wenn wir zum Beispiel in der Entfernung zwei Hügel sehen, von denen der eine mit seiner Basis sich vor den andern vorschiebt und den letzteren zum Theil verdeckt, so schliessen wir daraus unmittelbar, dass der deckende vor dem gedeckten liegt; denn wenn dies nicht der Fall wäre, so müsste der andere einen überstehenden Theil und eine nach unten sehende Begrenzungsfläche haben, wie sie an Hügeln nie vorkommt, und ausserdem müsste der Zufall es mit sich bringen, dass diese überhängende Grenzlinie desselben gerade in der Contourlinie des andern Hügels, wo dieser nicht deckt, ihre Fortsetzung fände. Es wäre dies eine an sich mögliche Auslegung des gesehenen Bildes, die aber aller Erfahrung widerspräche. Dasselbe kann natürlich bei allen möglichen Arten von Gegenständen vorkommen, die sich theilweis decken. Selbst wenn uns ihre Gestalt noch durchaus unbekannt ist, wird in den meisten Fällen der Umstand, dass die Contourlinie des deckenden Objects, wo sie über die Contourlinie des bedeckten hingeht, ihre Richtung nicht ändert, entscheidend sein, um den deckenden von dem gedeckten Gegenstande zu unterscheiden. Man kann auch leicht Täuschungen hervorbringen, wenn man absichtlich ein deckendes Papierblatt so hält, dass es eine Ecke darbietet, wo es mit dem theilweis gedeckten zusammenstösst, an letzterem aber die Contour in derselben Richtung fortläuft.

Am auffallendsten sind die Täuschungen, die auf diesem Principe beruhen, an spiegelnden und brechenden Flächen, die vor ihrer dem Beobachter zugekehrten Seite ein optisches Bild entwerfen. Die meisten Personen überzeugen sich nur schwer davon, dass dieses Bild vor dem Spiegel in der Luft liegt; denn sie sehen Lücken im Bilde, wo der Spiegel ein Fleckchen hat, sie sehen das Bild begrenzt durch den Rand des Spiegels, sie sehen überhaupt alle kleinen Unregelmässigkeiten des Spiegelbelegs ungetrübt durch das Bild hindurch. Das Bild erscheint durchaus als der bedeckte, also hintere Gegenstand, während es in der That der vordere ist. Ja selbst, wenn man mit Hilfe des zweiäugigen

Sehens, der Kopfbewegungen und der Accommodation sinnliche Momente in das Spiel bringt, welche die Wahrnehmung des Bildes an seinem richtigen Orte unzweideutig feststellen könnten, ist es nicht immer ganz leicht, sich von der Täuschung frei zu machen. Das beste Mittel ist noch, dass man in der Ebene des Bildes einen Schirm anbringt mit einem Ausschnitt, in dem das Bild erscheint, während der Rand der spiegelnden oder brechenden Fläche, die es entwirft, dadurch verdeckt wird. Dann sieht der Beobachter leicht, dass das Bild in der Ebene des Schirmes liegt [1].

Es gehört hierher ferner auch die Erfahrung, dass subjective Gesichtserscheinungen bei geöffneten Augen immer auf die Fläche der im Gesichtsfelde sichtbaren körperlichen Objecte projicirt erscheinen. Da sie bei Bewegungen des Auges sich mitbewegen, werden sie gleich als subjective Erscheinungen von den objectiven getrennt, und es wird ihnen keine Realität zugeschrieben, sondern sie erscheinen nur als Flecken auf den reellen Objecten, wenn die Aufmerksamkeit ihnen überhaupt zugewendet wird. Dies geschieht in der Regel sogar dann, wenn binoculare Nachbilder in beiden Augen entwickelt sind, welche die Wahrnehmung einer bestimmten Localisation im Raume möglich machen würden. Auch solche ist man meist geneigt auf die gesehenen reellen Objecte zu projiciren, statt eine stereoskopische Raumanschauung von ihnen auszubilden, und nur bei besonders darauf gerichteter Aufmerksamkeit gelingt das letztere.

In vielen Fällen genügt es zu wissen oder zu vermuthen, dass der gesehene Gegenstand eine Form von gewisser Regelmässigkeit hat, um sein perspectivisches Bild, wie es uns entweder das Auge oder eine künstlich gefertigte Zeichnung zeigt, richtig als Körperform zu deuten [2]. Wenn ein Haus, ein Tisch oder andere von Menschen gefertigte Gegenstände dargestellt sind, dürfen wir voraussetzen, dass deren Winkel rechte sind und deren Flächen Ebenen oder cylindrische und kugelige Flächen. Das genügt, um nach einer richtigen perspectivischen Zeichnung sich richtige Anschauungen des Objects zu bilden. Eine perspectivische Zeichnung eines Hauses oder eines physikalischen Apparates verstehen wir ohne Schwierigkeit, selbst wenn sie recht verwickelte Verhältnisse darstellt. Ist sie gut schattirt, so wird der Ueberblick noch leichter. Aber die vollkommenste Zeichnung oder selbst Photographie eines Meteorsteines, eines Eisklumpens, mancher anatomischen Präparate und ähnlicher unregelmässiger Gegenstände giebt kaum ein Bild ihrer körperlichen Form. Namentlich Photographien von Landschaften, Felsen, Gletschern bieten dem Auge oft nichts als ein halbverständliches Gewirr grauer Flecken, während dieselben Photographien bei passender stereoskopischer Combination die allerschlagendste Naturwahrheit wiedergeben.

Wenn dergleichen regelmässig gebildete Producte menschlichen Kunstfleisses, deren Grundformen rechtwinkelige Parallelepipede, Cylinder und Kugelflächen sind, aus der Nähe betrachtet werden, so dass die vorderen Theile in einem deutlich grösseren Maasstabe auf der Netzhaut sich abbilden als die hinteren, so

[1] Darüber siehe Dove in Poggendorff's Annalen LXXXV.
[2] Recklinghausen im Archiv für Ophthalmologie V, 2. S. 163.

lässt eine richtige perspectivische Abbildung derselben meist nur eine Deutung zu, und wir kommen nicht in Verlegenheit zu erkennen, welches die vorderen, welches die hinteren Theile sind. Werden sie aus grosser Ferne gesehen, oder sind sie sehr flach im Relief, so kann es aber zweifelhaft werden, wie sie zu deuten sind. Dahin gehört die von Sinsteden [1] an einer Windmühle gemachte Beobachtung, die sich des Abends gegen den hellen Himmel projicirte, so dass sie nur wie in einer Silhouette halb von der Seite erschien, als gleichmässig dunkles Object auf hellem Grunde, und nur ihre Umrisslinie sichtbar war. Er beobachtete nämlich, dass die Flügel der Mühle bald in der einen, bald in der andern Richtung herumzugehen schienen. Bei einem solchen Anblicke bleibt es nämlich unentschieden, ob die Frontseite der Mühle, welche die Flügel trägt, oder die Rückseite dem Beobachter zugekehrt ist, und ob er also die Flügel selbst schräg von vorn oder von hinten sieht. Sähe er sie von vorn, so würde die perspectivisch der Mühle zugekehrte Seite der Flügel ihm die nähere sein; sähe er sie von hinten, so würde diese ihm die fernere sein. Je nachdem er die eine oder andere Auslegung wählt, scheint die ihm zugekehrte Seite der Flügel bei der Drehung aufzusteigen oder abzusteigen, und er erhält also beim Wechsel der Deutung des Bildes auch eine scheinbar umgekehrte Bewegung der Flügel. Ob man nun in die eine oder andere Deutung der Erscheinung verfällt, hängt zunächst scheinbar vom Zufall ab. Auch lassen sich die Gründe, warum die Erscheinung oft plötzlich wechselt, nicht immer ermitteln; dagegen kann man auch willkührlich den Wechsel herbeiführen, nämlich dadurch, dass man sich das entgegengesetzte Verhalten der Mühle lebhaft vorstellt. So wie man dann den sinnlichen Eindruck als vollkommen übereinstimmend mit dieser Vorstellung wahrnimmt, tritt die Vorstellung als sinnliches Anschauungsbild ein.

Es gehört hierher auch folgende von Schroeder [2] angegebene Figur, welche ohne Schattirung in *Fig. 188* wiedergegeben ist. Dieselbe wird zuerst und am leichtesten als die geometrische Projection einer Treppe aufgefasst werden, so dass die mit *a* bezeichnete Fläche dem Beschauer näher ist, als die mit *b* bezeichnete, welche letztere die Wand darstellt, an die die Treppe sich anlehnt. Sie kann aber auch so aufgefasst werden, als sähe man ein überhängendes Mauerstück *b*, welches nach unten und links treppenförmig endet, so dass die Fläche *b* näher, *a* ferner wäre und der Beobachter von unten und links her nach der treppenförmigen Fläche schaut. Die erstere Deutung ist uns die geläufigere, und sie tritt deshalb meist zuerst ein, doch schlägt sie auch leicht und ohne bestimmt zu bezeichnenden Grund in

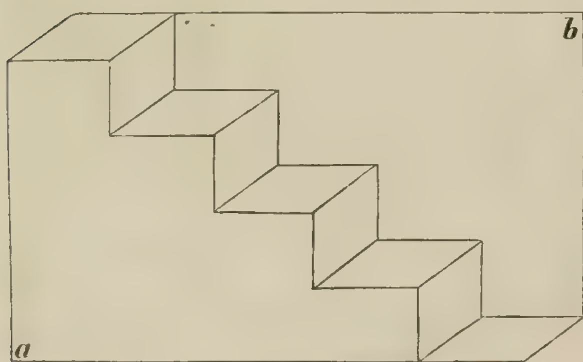


Fig. 188.

[1] Poggendorff's Annalen CXI, 336—339. Mohr ebenda 638—642.
[2] Poggendorff's Annalen CV, 298.

die zweite um. So wie ich mir aber lebhaft die eine oder andere Körperform vorstelle, so tritt auch sogleich die Anschauung derselben an der Figur hervor. Gelingt es nicht von selbst aus der ersten Anschauung in die zweite überzugehen, so kann man das, wie SCHROEDER bemerkt, dadurch bewirken, dass man das Buch langsam umdreht, bis das untere Ende desselben nach oben gekehrt ist, und während der ganzen Zeit die Figur betrachtet. Dann bleibt die Fläche *a*, die einmal dem Beschauer näher vorgestellt wird, ihm fortdauernd die nähere, und nach einer Drehung um 180° hat man genau dieselbe Figur wieder, wie im Anfang, nur dass die Buchstaben *a* und *b* ihre Lage vertauscht haben, und dass nur scheinbar die rechts oben gelegene senkrechte Fläche die nähere geworden ist. Bei SCHROEDER ist dieselbe Figur in zweierlei Weise schattirt, was den Erfolg weiter nicht verändert.

Aehnliches kann man an einer grossen Zahl perspectivischer Linienzeichnungen, zum Beispiel solchen, welche regelmässige Körper, Krystallmodelle u. s. w. in geometrischer Projection (also wie von einem unendlich entfernten Punkte aus gesehen) darstellen, beobachten. Dieselbe Ecke oder Kante kann bald einspringend, bald ausspringend erscheinen. Oft wechselt die Vorstellung unwillkührlich. Ich finde aber, dass man sie auch immer willkührlich wechseln lassen kann, wenn man lebhaft eine andere Deutung sich vorstellt.

Es schliessen sich hieran die Beobachtungen über die scheinbare Umkehrung des Reliefs von Matritzen für Medaillen, wobei indessen auch die Beschattung einen Einfluss ausübt. Wenn man von einer Medaille, welche in ziemlich flachem Relief geschnitten ist, einen Abguss in Gyps oder Stearin macht, der also eine Matritze darstellt, an der alle convexen Krümmungen des Originals concav, alle hervorragenden Theile vertieft erscheinen, und man diese Matritze so legt, dass sie von schräg überfallendem Tageslicht beleuchtet wird, und also kräftig schattirt erscheint, so glaubt man, mit einem Auge danach hinsehend, sehr leicht eine Patritze zu sehen von der ursprünglichen Form der Medaille. Sieht man mit beiden Augen gleichzeitig nach der Matritze hin, so schwindet in der Regel die Täuschung; ebenso wenn man den Kopf oder die Form hin- und herbewegt. Je ruhiger Auge und Object sind, desto leichter tritt die Täuschung ein. Namentlich ist sie unter den angegebenen Umständen fast unvermeidlich, wie SCHROEDER besonders hervorgehoben hat, wenn das Relief einen menschlichen Kopf oder Körper, oder auch thierische Formen, Blätter und dergleichen darstellt. Bei blossen Buchstaben und Ornamenten bleibt die Täuschung viel leichter aus.

Dabei tritt nun eine eigenthümliche Täuschung auch betreffs der Beleuchtung ein. Eine Hohlform nämlich zeigt die Schatten an der dem Fenster zugekehrten Seite, die Lichter an der abgekehrten; eine erhabene Form umgekehrt.

Wenn uns daher die Matritze als Patritze erscheint, so erscheint sie auch gleichzeitig von der dem Fenster entgegengesetzten Seite her beleuchtet zu sein. Dazu kommt nun noch, dass eine so schräg beleuchtete erhabene Form einen merklichen Schlagschatten auf den ebenen Grund werfen müsste, welcher Schlagschatten natürlich an der verkehrt gesehenen Matritze fehlt. Dadurch entsteht, wie SCHROEDER es nennt, eine Art magischer Beleuchtung des Reliefs, die

40 *

gleichsam aus dem Innern zu kommen scheint. Die Ursache davon scheint mir zu sein, dass der Schlagschatten auf dem ebenen Grunde fehlt, und daher dieser Grund wie transparent beleuchtet erscheint.

Man kann übrigens, wie schon RITTENHOUSE und nach ihm viele Andere bemerkten, die Täuschung erhöhen und erleichtern dadurch, dass man auch die Beleuchtung der Matritze umkehrt. Entweder, wie OPPEL in seinem Anaglyptoskop[1] gethan hat, dadurch, dass man das Licht des Fensters durch einen Schirm abhält und dafür einen Spiegel an der entgegengesetzten Seite anbringt, den der Beobachter nicht bemerkt; dann erscheint die scheinbare Patritze vom Fenster her beleuchtet zu sein. Oder man kann die Matritze durch ein spiegelndes rechtwinkeliges Prisma betrachten oder durch eine Linse, die ein umgekehrtes Bild von ihr entwirft. In allen diesen Fällen erscheint die Beleuchtung richtig, obgleich sie immer etwas fremdartiges durch den fehlenden Schlagschatten behält, namentlich, wenn das Relief sehr stark ist. Die Beobachtung durch eine umkehrende Linse trennt ausserdem für den Beobachter die Form aus ihrer übrigen Umgebung los und erfordert eine unveränderliche Lage des Auges, weil das Bild der Medaille sonst von der Grenze der Linse verdeckt wird. Alle diese Umstände begünstigen die Täuschung. Daher ist es wohl zu erklären, dass man sie bei solchen umgekehrten von Linsen und Spiegeln entworfenen Bildern zuerst wahrgenommen hat.

Dass es im Ganzen viel seltener gelingt, Patritzen als scheinbare Matritzen zu sehen, scheint nur davon herzurühren, dass jene gewöhnlich einige Schlagschatten zeigen, welche die Deutung der convexen als eine hohle Form unmöglich machen.

Eine eigenthümliche hierher gehörige Täuschung beschreibt D. BREWSTER[2]. Fusstapfen im Sande erschienen ihm erhöht. Es zeigte sich, dass der Wind helleren Sand hineingeweht und an einem Rande aufgehäuft hatte, so dass dieser Rand scheinbar stärker beleuchtet erschien. Auch der Mond, bei Tage durch ein umkehrendes Fernrohr betrachtet, erscheint, wie SCHWEIZER bemerkt, zuweilen in verkehrtem Relief.

SCHROEDER macht noch auf einige andere Täuschungen ähnlicher Art aufmerksam. Wenn wir ein rechteckiges Streifchen Papier auf eine horizontale Tischplatte legen und schräg von oben her mit einer umkehrenden Linse besehen, so sollte bei richtiger Umkehrung der obere Rand des Bildes vom Papier und der Tischplatte dem Beobachter näher erscheinen, der untere ferner. Der Regel nach verhält es sich umgekehrt, wir glauben vielmehr den Tisch und das Papier in ihrer wirklichen Richtung zu sehen, und wenn eine feine Nadel schräg in das Papier eingestochen wird, von der eine passend gestellte Lampenflamme einen scharf begrenzten Schlagschatten wirft, so erscheint uns vermöge derselben Umkehrung oft das Bild des Schattens als das der Nadel und umgekehrt. BREWSTER bemerkt, dass bei dieser Art der Täuschung ein in die Ebene eingeschnittenes Intaglio wegen der Umkehrung leicht als Relief hervortritt, weil man die nähere Seite desselben für die entferntere hält.

---

[1] Poggendorff's Annalen XCIX, 466—469.

[2] *Athenaeum* 1860, 2, p. 24; *Rep. of Brit. Assoc.* 1860, 2, p. 7—8.

Von noch grösserer Wichtigkeit, als die verschiedenartige Beleuchtung der Flächen eines Körpers je nach ihrer Neigung gegen die einfallenden Strahlen, sind die Schlagschatten. Wenn wir eine erleuchtete Fläche sehen, so muss sich der leuchtende Körper vor dieser Fläche befinden, und wenn ein Schlagschatten auf sie fällt, so muss sich der Schatten werfende Körper ebenfalls vor der Fläche befinden, die den Schatten empfängt. (Vor und hinter ist hier in Beziehung auf die Fläche zu nehmen, nicht in Beziehung auf die Stellung des Beobachters.) Dadurch ist also eine gewisse geometrische Beziehung des Schatten werfenden Körpers zur beschatteten Fläche unzweideutig festgestellt. Eine wie entscheidende Rolle die Schlagschatten in der Deutung der Gesichtserscheinungen spielen, werden wir später bei den pseudoskopischen Erscheinungen noch ersehen. Auch ist allgemein bekannt, eine wieviel deutlichere Vorstellung eine gut schattirte Zeichnung von einem Gegenstande giebt, als eine, die blos seine Umrisse darstellt; wie viel vortheilhafter für eine Landschaft, namentlich wenn man sie aus der Höhe sieht, die Beleuchtung des Sonnenaufgangs und Sonnenuntergangs ist, als die der hochstehenden Sonne. Es kommen hier nicht blos die reicheren Farben in Betracht, welche die tief stehende Sonne giebt, sondern auch namentlich die bessere Modellirung der Formen des Terrains, welche durch die reichere Schattirung entsteht. Im Allgemeinen sind ja wenige Abhänge so steil, dass sie bei hoch stehender Sonne nicht beleuchtet wären. In der Mittagsbeleuchtung ist daher mit wenigen Ausnahmen alles hell und wenig Schatten vorhanden; die Formen der Berge und Thäler, wo sie nicht sehr schroff sind, sind deshalb wenig deutlich. Wenn dagegen die Sonne schräg steht und viele Abwechselung von Licht und Schatten giebt, so wird alles viel deutlicher und verständlicher.

Ein weiteres von der Beleuchtung hergenommenes Moment für die Beurtheilung der Entfernung namentlich entfernterer Gegenstände giebt die sogenannte Luftperspective. Wir verstehen darunter die Trübung und Farbenveränderung des Bildes ferner Objecte, welche durch die unvollkommene Undurchsichtigkeit der vor ihnen liegenden Luftschicht bewirkt wird. Die Luft, wenn sie schwach mit Wassernebel gefüllt ist, wie es in ihren tieferen Schichten, namentlich in der Nähe grosser Wasserflächen, gewöhnlich der Fall ist, wirkt wie ein trübes Medium, welches beleuchtet vor dunklem Hintergrunde selbst bläulich erscheint, eindringendes Licht heller Objecte aber mit röthlicher Farbe durchlässt. Je dicker die Luftschicht zwischen dem Auge des Beobachters und dem fernen Objecte ist, desto stärker wird dessen Farbe verändert, entweder in das Bläuliche, wenn es dunkler, oder in das Röthliche, wenn es heller als die vorliegende Luftschicht ist. So erscheinen ferne Berge blau, die untergehende Sonne roth.

Den Einfluss, den die Luftperspective auf unser Urtheil ausübt, können wir leicht bemerken, wenn die Luft ungewöhnlich klar oder ungewöhnlich trüb ist. Im ersteren Falle erscheinen ferne Bergreihen sehr viel näher und kleiner, im zweiten ferner und grösser als gewöhnlich. Für den Bewohner der Ebene beruht darauf eine gewöhnliche Art der Täuschung, wenn er in das Hochgebirge kommt. In der Ebene, namentlich in der Nähe grosser Wasserflächen,

ist die Luft gewöhnlich trüb, im Hochgebirge gewöhnlich ausserordentlich durchsichtig. So erscheinen denn dem Reisenden entfernte Berggipfel, namentlich wenn sie mit Schnee bedeckt im Sonnenschein glänzen, so klar, wie er sonst nur nahe Gegenstände gesehen hat, und er schätzt deshalb im Allgemeinen alle Distanzen und Höhen viel zu klein, bis er, ihre Dimensionen selbst durchmessend, durch Anstrengung und Erfahrung eines Bessern belehrt wird.

Hierher gehört auch die berühmte Frage, warum der Mond nahe dem Horizonte grösser aussieht, als wenn er hoch am Himmel steht, trotzdem er wegen der atmosphärischen Strahlenbrechung im verticalen Durchmesser dort eigentlich kleiner aussehen sollte. Dass er am Horizonte grösser erscheint, weil er uns dort weiter entfernt erscheint, haben schon Ptolemaeus und die arabischen Astronomen[1] richtig gewusst. Die eigentliche Frage ist also, warum erscheint uns das Himmelsgewölbe am Horizonte entfernter als im Zenith. Es sind eine Menge Motive dafür angeführt worden, warum dies so sei; ich glaube auch, dass nicht nur eines, sondern viele verschiedene Motive dahin zusammenwirken, wobei freilich schwer auszumitteln ist, welches das überwiegende in jedem einzelnen Falle sei.

Zunächst ist zu bedenken, dass kein entscheidender Grund da ist, warum der Sternenhimmel uns als eine regelmässige Kugelfläche erscheinen sollte. Er zeigt unendlich entfernte Objecte; daraus folgt nur, dass er als irgend welche Fläche von unbestimmter Form erscheinen kann, wenn irgend welche andere Motive ihm eine solche zuweisen. Wenn wir im leeren Raume schwebten und ihn gleichzeitig und gleichmässig in seiner ganzen Ausdehnung überschauen könnten, oder wenn seine Bewegung so schnell wäre, dass wir eine wirkliche sinnliche Anschauung davon erhalten könnten, möchte mehr Grund sein, ihn gerade als Kugelfläche anzuschauen. So aber ist in der That seine scheinbare Richtung und Gestalt eine sehr wechselnde, je nachdem das Stück, was wir von ihm sehen, von verschiedenen irdischen Gegenständen eingefasst ist, und wir einen höheren oder tieferen Punkt fixiren. Wir werden später noch sehen, dass wir eine Neigung haben, ihn bei ruhiger binocularer Fixation eines Punktes für eine auf die jedesmaligen Blicklinien senkrechte Ebene zu halten.

Ganz anders ist es mit dem Wolkenhimmel. Die Wolken sind meistens zwar auch weit genug von uns entfernt, dass wir mittels der Erkennungsmittel, welche das zweiäugige Sehen und die Bewegung unseres Körpers uns gewähren, nichts oder so gut wie nichts über ihre Entfernung ausmachen können. Aber sie sind oft parallelstreifig, sie bewegen sich meistens in gleicher Richtung und mit constanter Geschwindigkeit über das Himmelsgewölbe hin, sie erscheinen in der Nähe des Horizontes strichförmig, von der hohen Kante gesehen und so beleuchtet, dass man sie als perspectivisch verkürzte horizontal gedehnte Körper erkennen kann. Alles das kann dazu dienen, uns erkennen zu machen, dass die wahre Form des Wolkenhimmels wenigstens im Zenith ein sehr plattes Gewölbe ist. Am Horizont freilich verlassen uns diese Hilfs-

---

[1] Montucla *Histoire des Mathém.* Vol. I, p. 309 u. 352. — Rogeri Baconis Perspect., p. 118. — Porta de refractione, p. 24, 128. — Priestley Geschichte der Optik. Periode 6, Kap. 8.

mittel, und da erscheinen dann die Wolken wie die Berge gleichmässig auf eine von unten nach oben ansteigende und allmählig sowohl in den Erdboden, wie in das Himmelsgewölbe übergehende Fläche gemalt zu sein. Da wir nun kein Mittel der sinnlichen Anschauung haben, um die Entfernung des Wolkenhimmels von der des Sternenhimmels zu trennen, so scheint es nur natürlich, dass wir dem letzteren die wirkliche Form des ersteren, so weit wir sie unterscheiden können, mit zuschreiben, und dass auf diese Weise die doch immer sehr vage, unbestimmte und veränderliche Vorstellung von der flach kuppelförmigen Wölbung des Himmels entsteht.

Recht entschieden und überraschend tritt übrigens die Vergrösserung des Mondes oder der Sonne nur dann auf, wenn die Luft am Horizont recht dunstig ist und die genannten Himmelskörper nur noch eine geringe Lichtstärke zeigen. Dann haben wir an ihnen dieselbe Wirkung wie an fernen Bergen, sie sehen viel entfernter als bei klarer Luft und deshalb grösser aus. Auch verstärken passende irdische Objecte am Horizont die Wirkung sehr. Wenn der Mond zum Beispiel neben oder hinter einer etwa zwei tausend Fuss entfernten Baumkrone untergeht, welche selbst 20 Fuss Durchmesser hat, so erscheint er unter demselben Gesichtswinkel, aber viel weiter entfernt, also auch viel grösser als der Baum; während er hinter flachem Horizonte untergehend keinen Gegenstand zur Vergleichung findet, an dem wir erkennen könnten, dass seine geringe scheinbare Grösse einer sehr bedeutenden absoluten Grösse entspricht.

Wenn man mittels einer planparallelen Glastafel ein Reflexbild des Mondes entwirft, welches scheinbar nahe am Horizonte gelegen ist, so finde ich nicht, dass dasselbe entschieden grösser aussieht, als der direct gesehene Mond oben am Himmel, obgleich man die scheinbare Grösse des reflectirten Mondes dann leicht mit den gleichzeitig gesehenen irdischen Körpern vergleichen kann. Es fehlt aber dem Spiegelbilde das Aussehen, als sei es durch den dunstigen Theil der Atmosphäre gesehen.

Auch scheint mir, dass die scheinbare Vergrösserung am Horizonte viel bemerklicher am Monde auftritt, als an der Sonne, die, wenn man ihre Gestalt überhaupt noch erkennen kann, gewöhnlich auch noch hell genug ist, dass man sie nicht ganz bequem betrachten kann, und dass sie also auch nicht unmittelbar mit den irdischen Objecten des Horizonts auf eine Linie gestellt werden kann. Bei recht klarem Himmel ist aber die Täuschung auch für den Mond nicht gerade sehr evident. Sie hängt immer in sehr hohem Grade vom Zustande der Atmosphäre ab.

Die bisher genannten Motive sind es allein, welche die Maler benutzen können, um durch flächenhafte Zeichnungen und Gemälde eine Vorstellung von den dargestellten körperlichen Objecten zu geben. Leichter ist ihre Aufgabe, wo es sich um Objecte von wohlbekannter oder von geometrisch regelmässiger Form handelt, ersteres namentlich bei menschlichen und thierischen Gestalten, letzteres bei Häusern, Geräthen und anderen Erzeugnissen menschlichen Kunstfleisses. Bei solchen ist eine richtige perspectivische Zeichnung schon meistens ausreichend und kann durch eine richtige Schattengebung sehr lebendig gemacht

werden. In der Kunst der kräftigen Schattengebung, welche die Körperform so sehr deutlich heraustreten lässt, sind bekanntlich die alten Meister des Porträtirens so ausgezeichnet gewesen. Ein allseitig beleuchtetes, schwach beschattetes Gesicht, noch so richtig dargestellt, giebt einen lebhaften Eindruck allenfalls, so lange man die dargestellte Person noch oft sieht, aber es verliert seine Lebendigkeit bald, wenn dies nicht mehr geschieht. Schwieriger ist die Aufgabe des Malers, wenn er Naturgegenstände von unregelmässiger Form darzustellen hat, Landschaften, Berge, Felsen. Die Staffage mit Menschen, Thieren, Bäumen, Häusern giebt dann ein wichtiges äusserliches Hilfsmittel ab, um die Entfernung der dargestellten Objecte ungefähr zu bezeichnen. Luftperspective aber und Schatten sind die Hauptmittel. Daher ist nicht jede Beleuchtung einer Landschaft zur Darstellung geeignet. Ein gewisser Grad der Trübung der Luft und eine niedrig stehende Sonne, welche viel Wechsel von Schatten und Licht hervorbringt, sind wesentliche Erfordernisse, um nur die Formen der Landschaft deutlich werden zu lassen, abgesehen von den reicheren und mannigfacheren Färbungen, die auch ihre Schönheit erhöhen.

Die bisher beschriebenen Motive der Tiefenanschauung sind auch in psychologischer Beziehung interessant und wichtig, weil sie zeigen, welchen Einfluss die Erfahrung auf unsere scheinbar ganz unmittelbar und ohne Hilfe geistiger Thätigkeiten gewonnenen Sinneswahrnehmungen hat. Die Gesetze der Beleuchtung, des Schlagschattens, der Lufttrübung, der perspectivischen Darstellung und Deckung verschiedener Körper, die Grösse der Menschen und Thiere u. s. w. können wir erst durch Erfahrung kennen gelernt haben; wenigstens hat noch kein Vertheidiger der angeborenen Anschauungen ihre angeborene Ursprünglichkeit zu behaupten gewagt, und für einige derselben, welche längere Einübung erfordern, kann man, wie oben bemerkt, bei Kindern direct nachweisen, dass sie nicht angeboren sind. Und doch genügen diese Momente in vielen Verhältnissen, um eine Anschauung der räumlichen Formen und Verhältnisse von vollkommener sinnlicher Lebhaftigkeit hervorzurufen, ohne dass irgend ein Bewusstsein davon in uns rege wird, wie hierbei die Vergleichung des jetzigen Eindrucks mit früheren Eindrücken ähnlicher Art in das Spiel kommt. Das gegenwärtige Bild ruft in uns wach die Erinnerung an alles, was in früheren Gesichtsbildern Aehnliches sich gefunden hat, und auch an alles, was von sonstigen Erfahrungen mit diesen früheren Gesichtsbildern regelmässig verbunden war, also zum Beispiel die Anzahl von Schritten, die wir haben machen müssen, um an einen Menschen heranzukommen, dessen Erscheinung im Gesichtsfelde eine gewisse Grösse gehabt hatte u. s. w. Diese Art der Association der Vorstellungen geschieht nicht bewusst und nicht willkührlich, sondern wie durch eine blinde Naturgewalt, wenn auch nach den Gesetzen unseres eigenen Geistes, und sie tritt deshalb in unseren Wahrnehmungen ebenso gut als eine äussere uns zwingende Macht auf, wie die von aussen kommenden Eindrücke, und was wir daher vermittels dieser auf die gesammelten Erfahrungen sich stützenden Ideenassociationen den gegenwärtigen Empfindungen hinzufügen, erscheint ebenso gut, wie letztere, uns ohne Willkühr und ohne bewusste Thätigkeit von

unserer Seite als unmittelbar gegeben, also als unmittelbare Wahrnehmung, während es doch nur zu den Vorstellungen zu rechnen ist.

Besonders interessant sind hierbei solche Fälle, wie die Täuschungen über das Relief von Medaillen, von perspectivischen Zeichnungen und andere ähnliche, wo ein Schwanken zwischen zwei Deutungen möglich ist. Hier finden wir, dass wir beim ersten Anblick in eine dieser Deutungen unwillkührlich verfallen, und zwar der Regel nach wohl in diejenige, welche die grösste Anzahl ähnlicher Erinnerungsbilder zurückruft, wie bei den Reliefs von menschlichen Gesichtern, wo wir der Regel nach die der Wirklichkeit entsprechende convexe Form zu sehen glauben. In andern Fällen schwankt es unwillkührlich, wie bei Sinsteden's Windmühle, wenn durch äussere Zufälligkeiten oder Bewegungen des Auges bald diese bald jene Aehnlichkeit uns näher tritt. Aber wir können auch absichtlich einen Wechsel der Deutung hervorbringen, wenn wir die Vorstellung der entgegengesetzten Figur möglichst lebhaft in uns aufrufen, bis deren Aehnlichkeit mit dem eben angeschauten Gesichtsbilde sich geltend macht, wo sie dann von selbst und ohne weitere Anstrengung stehen bleibt. Während der Zeit aber, wo sie stehen bleibt, besteht sie mit der vollen Energie sinnlicher Gewissheit, und wenn sich in Folge irgend eines wechselnden Umstandes die entgegengesetzte Deutung wieder hervordrängt, hat auch diese wiederum dieselbe Deutlichkeit und Sicherheit, wenn auch das selbstbewusste Denken nun aufmerksam wird, dass es mit einer zweideutigen Anschauung zu thun hat.

Wir gehen jetzt über zur zweiten Klasse der Momente, auf denen sich die Tiefenwahrnehmung stützt, solche nämlich, denen bestimmte sinnliche Empfindungen zu Grunde liegen. Unter ihnen ist zuerst zu erörtern, wie viel die Accommodation des Auges leisten kann. Es ist kein Zweifel darüber, dass Jemand, der seine Accommodationsänderungen viel beobachtet hat und das Muskelgefühl der dazu gehörigen Anstrengung kennt, im Stande ist anzugeben, ob er bei der Fixirung eines Gegenstandes oder eines optischen Bildes für grosse oder kleine Sehweiten accommodirt. Aber die Beurtheilung der Entfernung mittels dieses Hilfsmittels ist äusserst unvollkommen. Wundt[1] hat darüber Versuche angestellt, indem er den Beobachter mit einem Auge durch eine Oeffnung eines feststehenden Schirms nach einem vertical ausgespannten schwarzen Faden hinblicken liess. Eine weisse Tafel bildete den Hintergrund. Der Faden konnte längs einer horizontal liegenden Scale verschoben und in gemessene Entfernungen vom Beobachter gestellt werden. Ueber seine absolute Entfernung konnten dabei so gut wie gar keine Angaben gemacht werden; wohl aber zeigte es sich, dass, wenn dem Faden nach einander zwei verschiedene Stellungen gegeben wurden, mittels der veränderten Accommodation erkannt werden konnte, ob sich der Faden entfernt oder genähert habe. Doch wurde dabei eine Annäherung des Fadens, wobei die active Muskelanstrengung des Accommodationsapparats zunehmen muss, deutlicher erkannt, als eine Entfernung desselben. Die bei den Versuchen eintretende Ermüdung des Auges

[1] Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig und Heidelberg 1862. S. 105—118.

bewirkte eine wachsende Unsicherheit in der Wahrnehmung auch der Annäherungen. Wundt giebt folgende Resultate seiner Versuche

Entfernung des Fadens vom Auge	Unterscheidungsgrenze für Annäherung	Unterscheidungsgrenze für Entfernung
250 Ctm.	12	12
220	10	12
200	8	12
180	8	12
100	8	11
80	5	7
50	4,5	6,5
40	4,5	4,5

Wenn zwei Fäden in verschiedener Entfernung gleichzeitig aufgespannt wurden, ergaben sich dieselben Resultate wie für die Annäherung eines Fadens.

Ich habe am Ende einer innen geschwärzten Röhre einen schwarzen Schirm mit zwei senkrechten Spalten angebracht, dann den einen mit einem rothen, den andern mit einem blauen Glase geschlossen. Ich bedurfte einer erheblich stärkeren Accommodationsanstrengung, um den rothen Streifen deutlich zu sehen, als für den blauen. Nach langen Vergleichen beider Streifen entstand auch endlich der Eindruck, als wäre der rothe Streifen näher, der blaue ferner, aber die Täuschung trat schwer ein und schwand leicht wieder, sie liess sich nur durch fortdauernd wechselnde Accommodation für den einen und den andern Streifen unterhalten. Die Täuschung liess sich dadurch unterstützen, dass ich den rothen Streifen etwas breiter machte und ihm auch dadurch das Ansehen eines näheren Objectes gab.

Wichtiger aber und genauer als alle die genannten Hilfsmittel, die Entfernungen zu schätzen, ist die Vergleichung der perspectivischen Bilder, welche derselbe Gegenstand, von verschiedenen Standpunkten aus gesehen, darbietet. Eine solche Vergleichung kann praktisch in doppelter Weise zu Stande kommen, entweder monocular bei Fortbewegung des Kopfes und Körpers, oder binocular mittels der beiden verschiedenen Bilder, welche beide Augen gleichzeitig von demselben Gegenstande geben. Da die beiden Augen etwas verschiedenen Ort im Raume haben, so sehen sie auch die vor uns liegenden Gegenstände von zwei etwas verschiedenen Gesichtspunkten aus und erzeugen dadurch eine ähnliche Verschiedenheit der Bilder, wie sie durch Fortbewegung im Raume nach einander hervorgebracht wird.

Wenn wir vorwärts gehen, so bleiben die Gegenstände, welche sich am Wege ruhend befinden, hinter uns zurück; sie gleiten in unserem Gesichtsfelde scheinbar an uns vorbei, und zwar in entgegengesetzter Richtung, als wir fortschreiten. Entferntere Gegenstände thun dasselbe, aber langsamer, während sehr entfernte Gegenstände, wie die Sterne, ruhig ihren Platz im Gesichtsfelde behaupten, so lange wir die Richtung unseres Körpers und Kopfes beibehalten. Es ist leicht ersichtlich, dass die scheinbare Geschwindigkeit der Winkelverschiebungen der Gegenstände im Gesichtsfelde hierbei ihrer wahren Entfernung umgekehrt proportional sein muss, so dass aus der Geschwindigkeit der schein-

baren Bewegung sichere Schlüsse auf die wahre Entfernung gemacht werden können.

Die Gegenstände verschiedener Entfernung verschieben sich dabei auch scheinbar gegen einander. Die entfernteren gehen im Vergleich zu den näheren scheinbar in Richtung des Beobachters vorwärts, die näheren umgekehrt scheinbar zurück. Dadurch entsteht eine sehr deutliche Anschauung ihrer verschiedenen Entfernung. Wenn man zum Beispiel in einem dichten Walde still steht, ist es nur in undeutlicher und gröberer Weise möglich, das Gewirr der Blätter und Zweige, welches man vor sich hat, zu trennen; zu unterscheiden, welche diesem und jenem Baume angehören, in welcher Entfernung die einzelnen hinter einander sich befinden u. s. w. So wie man aber sich fortbewegt, löst sich alles von einander, und man bekommt sogleich eine körperliche Raumanschauung von dem Walde, gerade so, als wenn man ein gutes stereoskopisches Bild desselben ansähe.

Auch ist leicht einzusehen, dass sich durch diese scheinbaren Verschiebungen der einzelnen Stämme, Aeste und Blätter gegen einander der wirkliche Wald im unmittelbaren sinnlichen Eindrucke durchaus unterscheiden muss von jedem noch so vollkommenen Gemälde dieses Waldes. Wenn wir an der ebenen Fläche des Gemäldes uns vorüberbewegen, bleibt die scheinbare Lage aller Theile desselben gegen einander im Gesichtsfelde durchaus die gleiche. Die, welche entfernte Objecte darstellen, verschieben sich gegen den Beobachter durchaus in derselben Weise, als benachbarte Theile, welche nahen Objecten entsprechen. Ein Gemälde kann immer nur den Anblick des Gegenstandes von einem einzigen festen Gesichtspunkte aus gesehen darstellen; wollen wir durch dasselbe eine möglichst vollkommene Täuschung hervorrufen, so muss auch der Beschauer seinen Standpunkt unverändert beibehalten. Jede Bewegung lässt sogleich den Unterschied zwischen dem Urbilde und dem Abbilde in sinnlicher Erscheinung hervortreten.

Nähere Gegenstände bewegen sich schneller, entferntere langsamer. Wenn wir selbst uns ungewöhnlich schnell bewegen, zum Beispiel in Eisenbahnzügen, so erscheinen uns die schnell vorübergleitenden Gegenstände deshalb leicht zu nah, und in Folge dessen auch kleiner, als sie sind. Es ist dies eine Gesichtstäuschung, welche von vielen Personen beobachtet und beschrieben wird [1]. Ich selbst habe diese Verkleinerung niemals recht deutlich sehen können, wie es denn viele solche Täuschungen giebt, welche bei der Gewohnheit grösserer Aufmerksamkeit auf die Gesichtserscheinungen von selbst schwinden, weil der Beobachter sich in seinem Urtheil von den störenden Einflüssen unabhängig zu machen lernt.

Auch bei wissenschaftlichen Beobachtungen kann man die scheinbaren relativen Verschiebungen verschieden entfernter Gegenstände oft benutzen. Soll man zum Beispiel das Fadenkreuz eines Fernrohrs auf das Bild des Objectes genau einstellen, so bewege man das Auge hinter dem Ocular ein wenig hin und her, von rechts nach links und zurück. Man wird dann sogleich sehen,

[1] Dove in Poggendorff's Annalen 1847. LXXI. S. 118.

ob das Fadenkreuz dabei im Verhältniss zum Bilde still steht oder sich verschiebt. Im ersten Falle fällt es mit dem Bilde zusammen. Im zweiten ist es vor oder hinter ihm; und welches von beiden der Fall sei, ergiebt sich ebenfalls sogleich.

Die Bestimmungen der Fixsternparallaxen beruhen bekanntlich auf derselben scheinbaren Verschiebung, wobei nur als Mittel der Fortbewegung des Beobachters die Bewegung der Erde um die Sonne benutzt wird.

Ich glaube auch, dass die Veränderungen des Retinalbildes bei Bewegungen des Körpers es hauptsächlich sind, wodurch einäugige Personen sich richtige Anschauungen von den körperlichen Formen der Umgebungen verschaffen. Wenn Jemand, der zwei gesunde Augen besitzt, eines derselben schliesst und unregelmässig gestaltete, unbekannte Gegenstände einäugig betrachtet, so erhält er eine falsche oder mindestens unsichere Vorstellung von ihrer Form. So wie er sich aber bewegt, gewinnt er sogleich die richtigen Anschauungen.

Auch vergesse man nicht, worauf bisher noch nicht immer der nöthige Nachdruck gelegt worden ist, dass in allen physiologisch-optischen Versuchen, wo es sich um Beurtheilung der Entfernung eines irgend wie gesehenen Objectes oder Bildes handelt, wohl darauf zu achten ist, dass der Kopf seine Lage gegen das Gesehene nicht ändere, sonst tritt sogleich eine verhältnissmässig gute und genaue Bestimmung der wirklichen Entfernung durch die dabei beobachtete Verschiebung ein.

Bei den bisher besprochenen Aenderungen des Retinalbildes durch Bewegung entsteht eine Anschauung von den Entfernungsunterschieden nur dadurch, dass das augenblicklich bestehende Bild verglichen wird mit den in der Erinnerung bewahrten unmittelbar vorhergegangenen Bildern im Auge. Wir haben schon in der Lehre vom Contrast hervorgehoben, dass eine Vergleichung mittels der Erinnerung viel unsicherer zu sein pflegt, als eine Vergleichung zweier gegenwärtiger sinnlicher Eindrücke. So ist nun auch die Beurtheilung der Entfernungen mittels der gleichzeitigen Bilder beider Augen viel vollkommener, sicherer und genauer, als sie durch Bewegungen wenigstens innerhalb so geringer Distanzen, wie die Entfernung der Augen von einander ist, gewonnen werden kann.

Jedes einzelne Auge zeigt uns ein perspectivisches Bild der vor uns gelegenen Gegenstände. Da aber beide Augen nicht denselben Platz im Raume einnehmen, also die Objecte von etwas verschiedenen Gesichtspunkten aus betrachten, so sind die beiden perspectivischen Bilder, welche sie von ihnen entwerfen, auch etwas von einander verschieden. Wenn ich ein Blatt Papier so vor mich hinhalte, dass es in die verlängerte Mittelebene meines Kopfes fällt, so sehe ich mit dem rechten Auge die rechte Seite des Papiers, mit dem linken die linke. Das entferntere Ende dieses Papiers erscheint im Bilde meines rechten Auges rechts, in dem des linken links von dem näheren zu liegen. Aehnliche Unterschiede, mehr oder weniger merklich, wird man bei genauerer Aufmerksamkeit viele finden, so oft man mit beiden Augen eine Anzahl verschieden entfernter Gegenstände betrachtet. Es sind Unterschiede derselben Art und Grösse, wie sie entstehen, wenn man das Gesichtsfeld einäugig ansieht, das Auge aber fortbewegt um eine Strecke, welche der Entfernung beider Augen von einander gleich ist.

Betrachtet man dagegen eine ebene Zeichnung oder ein ebenes Gemälde, so erhalten beide Augen dadurch durchaus dasselbe Netzhautbild (abgesehen etwa von den perspectivischen Verziehungen, die die Ebene des Gemäldes selbst in den beiden Netzhautbildern erleiden kann), während der im Gemälde dargestellte Gegenstand, wenn er nicht selbst eben ist, nothwendig in beiden Augen verschiedene Netzhautbilder hervorrufen würde. Dadurch ist also wiederum in der unmittelbaren sinnlichen Anschauung ein Kennzeichen gegeben, wodurch sich der Anblick eines jeden nach drei Dimensionen ausgedehnten Objects unterscheiden muss von dem Anblick eines ebenen Bildes desselben Objects.

Auch ist klar, dass, wenn der Ort der beiden Netzhautbilder eines leuchtenden Punktes gegeben ist, daraus für die wissenschaftliche Untersuchung wenigstens, wenn auch noch nicht nothwendig für das gemeine Bewusstsein, unzweideutig der Ort des leuchtenden Punktes gefunden werden kann. Man lege durch jedes Netzhautbild und den Knotenpunkt des betreffenden Auges eine gerade Linie, so muss, wie wir früher gezeigt haben, der leuchtende Punkt selbst in jeder dieser beiden Richtungslinien liegen. Also liegt er, wo sich beide schneiden.

Während also durch das einäugige Sehen bei ruhendem Kopfe nur die Richtung, in welcher der gesehene Punkt sich befindet, bestimmt ist, giebt das zweiäugige Sehen hinreichende Beobachtungsthatsachen, dass aus ihnen auch die Entfernung des gesehenen Punktes bestimmt werden kann, wenigstens insoweit, als die vorhandenen Data hinreichende Genauigkeit dazu haben und zu dem angegebenen Ende zweckmässig benutzt werden. Im Allgemeinen ist die Genauigkeit in der Bestimmung der Entfernung desto kleiner, je grösser diese selbst ist, da weit entfernte Gegenstände in beiden Augen nicht mehr merklich verschiedene Bilder geben.

Dass nun in der That auf diesem Wege ausserordentlich genaue und deutliche sinnliche Anschauungen der Entfernungen gewonnen werden, lässt sich mittels der *stereoskopischen Bilder* zeigen; es sind dies Bilder, von denen je zwei zusammengehörige die beiden Ansichten darstellen, welche das rechte und das linke Auge desselben Beobachters von dem dargestellten Objecte haben.

Wir haben gesehen, dass ein einzelnes ebenes Bild, mit beiden Augen gesehen, stets einen andern Eindruck machen muss, als der Gegenstand des Bildes, selbst gesehen, machen würde. Wenn wir nun aber beiden Augen verschiedene Bilder zeigen, einem jeden dasjenige, welches es bei Betrachtung des Gegenstandes selbst wirklich gesehen haben würde, so sind wir im Stande, denselben Eindruck auf beiden Netzhäuten hervorzurufen, den der räumlich ausgedehnte Gegenstand wirklich gemacht haben würde, und unter diesen Umständen gewinnen wir durch die beiden Bilder in der That dieselbe Anschauung der körperlichen Form, wie bei wirklicher Betrachtung des Gegenstandes selbst.

Zwei Bilder, welche einen stereoskopischen Effect machen sollen, müssen also zwei verschiedenen perspectivischen Ansichten desselben Gegenstandes entsprechen, welche von verschiedenen Gesichtspunkten aus aufgenommen sind. Sie dürfen einander also nicht gleich sein, vielmehr müssen, verglichen mit den Bildern unendlich entfernter Punkte, die Bilder näherer Punkte in der Zeichnung für das rechte Auge desto mehr nach links hin, in dem Bilde für

das linke Auge desto mehr nach rechts hin liegen, je näher die Objecte dem Beobachter sind. Denkt man sich also die Zeichnungen so aufeinander gelegt, dass die Bilder der unendlich entfernten Gegenstände aufeinander fallen, so werden die Bilder der näheren Objecte desto weiter auseinander fallen, je näher sie sind. Ihre Distanz kann man die stereoskopische Parallaxe nennen. Diese ist positiv, wenn die näheren Punkte für das rechte Auge nach links, für das linke nach rechts abweichen. Die stereoskopische Parallaxe ist gleich gross für Objecte, welche gleichen Abstand von der Ebene der Zeichnung haben.

Sind keine unendlich entfernten Objecte in der Zeichnung dargestellt, so kann man nur die Unterschiede der stereoskopischen Parallaxe ermitteln in Bezug auf irgend welchen beliebigen Punkt des Objects. Die Parallaxe in Bezug auf solchen Ausgangspunkt ist dann positiv für die näheren, negativ für die entfernteren übrigen Punkte.

Nennen wir den Abstand der Augen $2a$, den Abstand der Zeichnung von den Augen b, den Abstand des Objects von einer parallel der Zeichnung durch die Augen gelegten Ebene ϱ, und e die stereoskopische Parallaxe, so ist diese

$$e = \frac{2ab}{\varrho},$$

wird also desto kleiner, je entfernter das Object, und für unendlich entfernte Objecte gleich Null.

Die zusammengehörigen stereoskopischen Bilder müssen bei einem solchen Versuche so vor die beiden Augen gebracht werden, dass die unendlich entfernten Punkte darin beiden Augen in derselben Richtung erscheinen. Man kann dies ohne Instrument erreichen, wenn man beide Bilder neben einander legt, eins rechts, das andere links, so dass zusammengehörige Punkte derselben etwa so weit von einander entfernt sind, als die Knotenpunkte der beiden Augen des Beobachters. Wenn der Beobachter sich dann mit parallel gerichteten Gesichtslinien vor die Bilder stellt, so sieht er sie beide mit beiden Augen in gleicher Richtung und die stereoskopische Täuschung tritt ein. Freilich sieht er hierbei mit dem rechten Auge nicht blos das rechte Bild, sondern links daneben auch noch das für das linke Auge bestimmte Bild, und ebenso mit dem linken Auge nicht blos das letztere Bild, sondern rechts daneben auch noch das andere. Wenn die richtige Stellung der Augen gefunden ist, sieht der Beobachter also neben einander scheinbar drei Bilder, von denen die beiden äussern nur mit je einem Auge gesehen sind (das rechte vom linken, das linke vom rechten Auge) und nicht körperlich erscheinen, das mittlere beiden Augen zugleich angehört und körperlich erscheint.

Bei dem beschriebenen Versuche ist die Anwesenheit der drei Bilder störend; ausserdem muss man für die Nähe accommodiren, während man die Gesichtslinien parallel einstellt, wie es beim Betrachten ferner Gegenstände der Fall ist, und wobei man gewöhnt ist die Accommodation für die Ferne einzurichten. Deshalb gehört einige Uebung dazu, ehe man in dieser Weise ohne weitere Hilfsmittel stereoskopisch sehen lernt. Uebrigens ist die dabei entstehende Gesichtstäuschung ebenso vollkommen, wie bei der Anwendung der gleich zu beschreibenden

Instrumente. Ungeübte erleichtern sich das Gelingen des Versuchs, wenn sie nach den beiden Zeichnungen durch zwei innen geschwärzte Röhren blicken, weil dann die Nebenbilder fortfallen, und wenn sie dabei den beiden Zeichnungen eine geringere Distanz geben, als die der Augen ist. Bei einiger Uebung gelingt es auch ohne solche Hilfe; und es ist dies sogar die bequemste Art, grosse Mengen stereoskopischer Bilder hinter einander durchzusehen. Statt die Gesichtslinien nach einem weit entfernten Punkte einander nahehin parallel zu richten, kann man sie auch nach einem näheren Punkte convergiren lassen und die stereoskopischen Bilder zur Deckung bringen, indem man das rechte Auge nach dem linken, das linke nach dem rechten Bilde hinwendet, wobei ihre Blicklinien sich also zwischen den Bildern und dem Beobachter schneiden. Die Stellung der Augen ist dabei also so, als wenn man diesen Schnittpunkt fixirte, und dort, also den Augen näher, als die Bilder wirklich sind, erscheint auch der stereoskopisch gesehene Gegenstand. Bei diesem Versuche muss man aber natürlich auch das für das rechte Auge bestimmte Bild nach links legen, das für das linke nach rechts, sonst wird die stereoskopische Parallaxe negativ, und man bekommt verkehrtes Relief, wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man zwei neben einander liegende Linienzeichnungen ohne Schattirung, zum Beispiel von Krystallmodellen bald mit ungekreuzten, bald mit gekreuzten Blicklinien combinirt.

Die Instrumente, welche unter dem Namen der Stereoskope zur Betrachtung der stereoskopischen Bilder gebraucht werden, haben nur zum Zweck, dem Beobachter die Auffindung und Erhaltung der richtigen Augenstellung zu erleichtern und die störenden Nebenumstände wegzuschaffen; für die Erzeugung der Gesichtstäuschung sind sie ohne wesentlichen Vortheil.

Das erste war das Stereoskop von Wheatstone, im Durchschnitte dargestellt in *Fig. 189*. Der wesentliche Theil des Instruments sind zwei Spiegel ab und $\alpha\beta$, welche unter 45^{0} gegen den Horizont geneigt sind, und deren nach oben gekehrte Flächen spiegeln; cd und $\gamma\delta$ sind Brettchen, an denen die Zeichnungen angebracht werden. Der Beobachter, dessen Augen durch r und ϱ angedeutet sind, blickt von oben her in die Spiegel. Das Licht, was von cd kommt, wird vom Spiegel ab gegen das Auge r so reflectirt, als käme es von dem Spiegelbilde ff. Aber auch das von $\gamma\delta$ kommende Licht wird durch den Spiegel $\alpha\beta$ nach dem Auge ϱ so reflectirt, als käme es vom Bilde ff. So glauben also beide Augen das betreffende Bild bei ff zu sehen, und wenn nun die beiden Bilder Unterschiede zeigen, wie sie ein bei f befindlicher Gegenstand zeigen

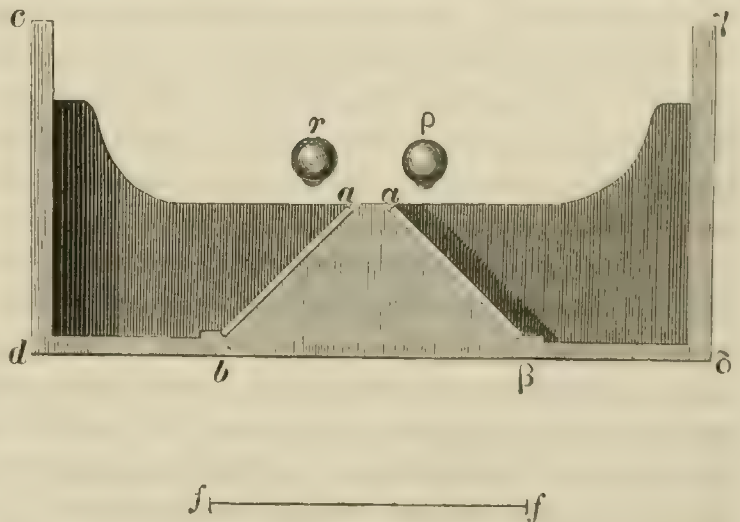


Fig. 189.

würde, so entsteht derselbe sinnliche Eindruck, als sähe der Beobachter bei *ff* nicht die Bilder, sondern den räumlich ausgedehnten Gegenstand. Da die Zeichnungen hierbei durch Spiegel gesehen werden, welche rechts in links verkehren, so müssen sie negative stereoskopische Parallaxe haben.

Das Stereoskop von Brewster, welches gegenwärtig am meisten verbreitet ist, enthält zwei Prismen p und π mit convexen Flächen, Stücke aus einer dicken Convexlinse von 0,18 Meter Brennweite, die optisch wirken wie die Combination eines ebenen Prisma mit einer Convexlinse. Die beiden Zeichnungen ab und $\alpha\beta$, *Fig. 190*, befinden sich neben einander auf demselben Blatte. Das rechte Auge r blickt durch das Prisma p nach der Zeichnung ab, das linke Auge ϱ durch das Prisma π nach der Zeichnung $\alpha\beta$; die Scheidewand g hindert, dass jedes Auge die für das andere bestimmte Zeichnung sehen kann. Die von den Zeichnungen ausgehenden Strahlen cp und $\gamma\pi$ werden durch die Prismen in die Richtungen pr und $\pi\varrho$, welche sich verlängert in q schneiden, gebrochen. Durch die convexen Flächen der Prismen werden die Strahlenbündel zugleich weniger divergent gemacht, so dass beide Augen ein Bild der zugehörigen Zeichnung in $f\varphi$ sehen. Das Object erscheint körperlich in der Lage $f\varphi$. Das Ganze ist in einen passenden Holzkasten eingeschlossen; um transparente Bilder betrachten zu können, befindet sich hinter den Zeichnungen $ab\,\alpha\beta$ eine mattgeschliffene Glasplatte. Die Bilder werden durch passende Spalte an den Seiten des Kastens bei a und β ein- und ausgeschoben.

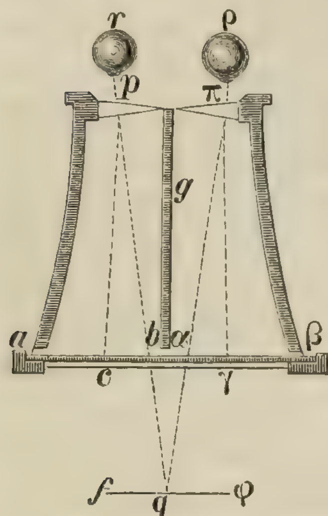


Fig. 190.

Das Stereoskop von Brewster ist viel compendiöser, als das von Wheatstone, man kann leichter eine gleichmässige Beleuchtung beider Bilder bewirken und die Zeichnungen erscheinen vergrössert; doch ist zu bemerken, dass an den Grenzen von Hell und Dunkel schmale farbige Ränder auftreten, wenn die Prismen nicht achromatisch gemacht werden, was übrigens in manchen dieser Instrumente geschehen ist. Andere Formen von Stereoskopen werden weiter unten beschrieben werden.

Am schlagendsten treten die Wirkungen des Stereoskops hervor an Zeichnungen, welche nur Umrisse von Körpern und Flächen darstellen, wo alle weiteren Hilfsmittel der Täuschung, Farbe, Schatten u. s. w. fortfallen, und doch die schwarzen Linien von der Fläche des Papiers vollkommen losgelöst und durch den Raum hin gezogen erscheinen. Selbst die verwickeltesten stereometrischen Zeichnungen, Darstellungen von Krystallmodellen, die ohne Stereoskop gesehen kaum verständlich sind, lösen sich vollständig auf und erscheinen als räumliche Gebilde.

Während bei solchen Linienfiguren der Unterschied zwischen dem stereoskopischen und nicht stereoskopischen Anblicke am auffallendsten ist, ist die Lebhaftigkeit der Täuschung selbst natürlich am grössten, wenn auch durch eine naturgetreue Schattirung die Körperform herausgehoben ist. Doch ist es fast unmöglich, mit dem

Bleistift oder dem Pinsel in der Schattirung von Zeichnungen die feinen Unterschiede beider Bilder genau wiederzugeben, welche dem Bilde des rechten und linken Auges entsprechen, und nur mit Hilfe der Photographie gelingt es, die genaue Uebereinstimmung beider Bilder zu erreichen, welche für einen guten stereoskopischen Eindruck nöthig ist. Da dergleichen stereoskopische Photographien jetzt überall im Handel zu haben sind, so darf ich voraussetzen, dass sie meinen Lesern allgemein bekannt sind. Sie werden angefertigt, indem man denselben Gegenstand zwei Mal photographisch abbildet, und zwar von zwei etwas verschiedenen Standpunkten aus. Entweder thut man es gleichzeitig mit zwei photographischen Apparaten oder schnell nach einander mit demselben Apparate. Die Anwendung von zwei Apparaten ist namentlich bei schnell veränderlichen Gegenständen nöthig. Schon wenn die Objecte von der Sonne direct beleuchtet sind, verschieben sich die Schlagschatten oft merklich zwischen der Aufnahme des ersten und zweiten Bildes, da doch gewöhnlich 5 bis 10 Minuten vergehen, ehe der Apparat für die zweite Aufnahme eingestellt ist. Noch nothwendiger ist die Anwendung zweier photographischer dunkler Kammern, wenn sogenannte instantane Bilder von beweglichen Gegenständen, Wellen, Schiffen, Pferden u. s. w. gemacht werden sollen, bei denen unter Benützung scharfer Sonnenbeleuchtung und sehr empfindlicher photographischer Präparate die Expositionszeit auf einen Bruchtheil einer Secunde beschränkt werden kann.

Die Naturwahrheit solcher stereoskopischer Photographien und die Lebhaftigkeit, mit der sie die Körperform darstellen, ist nun in der That so gross, dass manche Objecte, zum Beispiel Gebäude, die man aus stereoskopischen Bildern kennt, wenn man später in Wirklichkeit vor sie hintritt, nicht mehr den Eindruck eines unbekannten oder nur halb bekannten Gegenstandes machen. Man gewinnt in solchen Fällen durch den wirklichen Anblick des abgebildeten Gegenstandes, wenigstens für die Formverhältnisse, keine neuen und genaueren Anschauungen mehr, als man schon hat. Wie viel durch das stereoskopische Sehen gewonnen wird, ist auch hierbei natürlich am auffallendsten an den Bildern solcher Gegenstände, welche sich schlecht zur Darstellung in einer einfachen Zeichnung oder Gemälde eignen, wie zum Beispiel an Bildern von unregelmässigen Felsen, Eisblöcken, mikroskopischen Objecten, Thieren, Wäldern u. s. w. Namentlich die Abbildungen von Gletschereis mit seinen tiefen Spalten, welche durch die Masse des Eises hindurch erleuchtet sind, machen eine überraschende Wirkung. Das einzelne Bild, einzeln betrachtet, macht in solchem Falle gewöhnlich nur den Eindruck eines unverständlichen Aggregats grauer Flecke, während in der stereoskopischen Combination die Formen der Eisblöcke, so wie das transparente und reflectirte Licht derselben auf das deutlichste hervortreten. Es wird in diesem Falle das Verständniss des einzelnen Bildes so schwer, weil einmal schon so unregelmässige Formen, wie die der Eisblöcke, auch bei blosser Beleuchtung durch auffallendes Licht nicht deutlich wiederzugeben sind, vollends aber bei der transparenten Beleuchtung auch die gewöhnlichen Gesetze der Schattirung ganz abgeändert werden.

Sehr überraschend ist auch die stereoskopische Darstellung glänzender Gegenstände, z. B. einer von leichten Wellen bewegten Wasserfläche; doch können

wir die stereoskopische Darstellung des Glanzes erst im folgenden Paragraphen besprechen.

Wir gehen nun über zur Untersuchung der Genauigkeit, mit welcher sich die Tiefendimensionen des Gesichtsfeldes mittels der gleichzeitigen Thätigkeit beider Augen beurtheilen lassen. Dabei haben wir zu unterscheiden die Beurtheilung der absoluten Entfernung der gesehenen Objecte, und die Beurtheilung der Entfernungsunterschiede verschiedener Objectpunkte. Die erstere kann bei Ausschluss der früher besprochenen Momente nur gestützt werden auf die Empfindung des absoluten Grades der Convergenz, in welchem sich die beiden Blicklinien befinden, wenn sie auf einen gewissen Objectpunkt gerichtet sind; die Unterschiede der beiden Netzhautbilder können dazu nichts beitragen, oder wenigstens sind, wie es scheint, diejenigen Unterschiede der Bilder, welche etwa dazu beitragen könnten, zu unbedeutend, als dass daraus ein wirklicher Nutzen gezogen würde. — Die Beurtheilung der Entfernungsunterschiede verschiedener Objectpunkte beruht auf dem Unterschiede der Bilder in beiden Sehfeldern. Sie könnte beruhen, einmal auf einer Perception des Unterschiedes der beiden Netzhautbilder bei ruhenden Blicklinien, oder auf einer Perception der Bewegungsunterschiede, welche eintreten, wenn die Augen von der Fixation eines Objectpunkts zu der eines andern übergeführt werden. Bei den bisherigen Versuchen hat sich noch kein Unterschied in der Schärfe der Wahrnehmung herausgestellt, der von der Vermeidung oder Ausführung von Augenbewegungen abhinge, und die Vergleichung der Netzhautbilder scheint daher mit so überwiegender Feinheit vollzogen zu werden, dass die Bewegungsunterschiede daneben nicht berücksichtigt zu werden brauchen. Wir werden später indessen sehen, dass namentlich bei schwer zu combinirenden Bildern die Evidenz der Täuschung durch die Bewegungen des Auges wesentlich unterstützt wird.

Wir beginnen mit der Beurtheilung der Entfernungsunterschiede, soweit dieselbe von der Vergleichung verschiedener Netzhautbilder abhängt, wobei aber wohl zu verstehen ist, dass hier die Differenzen der Bilder in beiden Sehfeldern als solche noch nicht zum Bewusstsein kommen, sondern nur die Unterschiede der Tiefendimension, die von jenen Unterschieden abhängen, aufgefasst und geschätzt werden.

Die Vergleichung der beiden Netzhautbilder, wie sie sich in der Wahrnehmung der Tiefendimension zu erkennen giebt, ist ausserordentlich genau, und es werden darin zuweilen Unterschiede wahrgenommen, welche kaum in anderer Weise ohne künstliche Messinstrumente wahrgenommen werden können. Schon bei den gewöhnlichen stereoskopischen Photographien sind die Unterschiede beider Bilder meistens so klein, dass eine ausserordentlich genaue Untersuchung dazu gehört dieselben zu entdecken, und gewöhnlich bemerkt man Unterschiede nur längs der Contourlinien vorderer Gegenstände, welche die dahinter liegenden bald im rechten, bald im linken Bilde etwas mehr verdecken.

Dove [1] hat schon folgende Beispiele von der Genauigkeit des stereoskopischen Sehens gegeben:

---

[1] Optische Studien von W. H. Dove. Berlin 1859. S. 26—36.

Wenn man zwei Medaillen, die mit demselben Stempel geschlagen sind, aber aus verschiedenen Metallen, stereoskopisch combinirt, so sieht das Gesammtbild schräg liegend und gewölbt aus, nicht eben. Der Grund davon beruht darin, dass die Metalle durch den Druck des Stempels beim Prägen comprimirt werden und sich nachher ihrer verschiedenen Elasticität entsprechend wieder verschieden stark ausdehnen. Deshalb sind Medaillen aus verschiedenen Metallen geprägt nicht genau gleich gross, aber ihre Grössenunterschiede sind ausserordentlich klein. Ich selbst habe bei Professor Dove solche Medaillen gesehen, eine aus Silber, eine aus Bronze bestehend, deren Grössenunterschied mit blossem Auge gar nicht zu entdecken war, selbst wenn man sie aufeinander legte, und die doch ein deutlich gewölbtes Bild gaben.

Wenn in einer Buchdruckerpresse derselbe Satz von Buchstaben zwei Mal gesetzt wird, so ist es, wenigstens ohne ungewöhnliche Vorsichtsmassregeln, nicht möglich, die Abstände der Buchstaben genau gleich zu machen. In Folge dessen erscheinen im Stereoskop bei der Combination zweier solcher Drucke einzelne Worte und Buchstaben vor oder hinter den andern liegend. Ganz eben erscheint ein solcher Druck nur, wenn beide Exemplare mit demselben Buchstabensatze gedruckt sind; und auch dann kann das Ganze noch gewölbt und schräg liegend erscheinen, wenn durch verschiedene Befeuchtung oder Zerrung das Papierblatt im Ganzen sich gedehnt hat; doch erscheinen dann keine unregelmässigen Erhöhungen einzelner Buchstaben.

Wie man auf diese Weise die zweite Auflage eines Drucks von der ersten unterscheiden kann, so kann man auch nachgemachte Geldpapiere von ächten unterscheiden, weil es nicht möglich ist in der Copie den Abstand der Buchstaben so genau gleich denen des Orginals zu machen, dass nicht Erhebungen und Vertiefungen einzelner unter ihnen zum Vorschein kämen, wenn man ein ächtes und ein unächtes Papier im Stereoskope combinirt. Auch an zwei ächten Exemplaren desselben Werthpapiers zeigen sich übrigens solche Theile, welche mit verschiedenen Druckplatten gedruckt sind, gewöhnlich in verschiedener Ebene, und man kann mittels des Stereoskops leicht ermitteln, wieviel Platten zum Drucke des Papiers angewendet sind. Sehr bequem ist dieselbe Methode auch, um an Maasstäben zu controlliren, ob die Theilstriche alle gleich gross sind. Man braucht nur zwei verschiedene Theile desselben Maasstabs stereoskopisch zum Decken zu bringen. Sind die Theile gleich gross, so erscheinen alle Theilstriche in einer Ebene zu liegen. Sind die Theile unregelmässig, so treten einige Striche vor, andere zurück.

Ein anderes Beispiel solcher kleinen Verschiebungen, welche durch stereoskopische Combinationen leicht sichtbar werden, und welches mir gelegentlich auffiel, ist folgendes. Wenn man mit einem Auge frei, mit dem anderen aber durch den warmen Luftstrom über dem Schornstein einer brennenden Lampe nach der Tapete des Zimmers blickt, so sieht man bei einiger Aufmerksamkeit eine grosse einspringende und eine ausspringende Falte in der Tapete, als hätte sich diese von der Mauer losgelöst. Sieht das rechte Auge durch den warmen Luftstrom, so erscheint rechts die vorspringende, links die zurückspringende Falte; umgekehrt dem linken Auge. Am deutlichsten wird das

Phänomen, wenn sich der Beobachter etwa drei Fuss von der Wand aufstellt, und die Lampe in die Mitte dieser Entfernung. Dann fallen die beiden ausspringenden Falten für beide Augen an denselben Ort zusammen und die Wirkung verstärkt sich somit. Die Erscheinung erklärt sich durch die Brechung des Lichts in dem warmen Luftstrom. Sei dessen Querschnitt durch den Kreis A in *Fig. 191* angedeutet, r und ϱ seien die beiden Augen des Beobachters, a, b, c Punkte der Wand, so erscheinen diese dem Auge r in Richtung der drei geradlinigen Richtungsstrahlen ra, rb und rc. In das Auge ϱ gelangen die Strahlen aber auf den Wegen $aa_1\varrho$, $b\varrho$ und $cc'\varrho$, wegen der Brechung in dem warmen Luftstrome A. Nur der durch dessen Mitte gehende Strahl $b\varrho$ kann geradlinig bleiben. Dem Auge ϱ erscheinen die Punkte c und a also in Richtung der Verlängerung der Strahlen $\varrho c'$ und $\varrho a'$, beiden Augen zusammen also in γ und α, wo sich beziehlich $\varrho c'$ mit rc und $\varrho a'$ mit ra schneidet. So erscheint also die Tapete hervorgetrieben auf der Seite des Auges, welches durch den warmen Luftstrom sieht, auf der andern Seite zurücktretend.

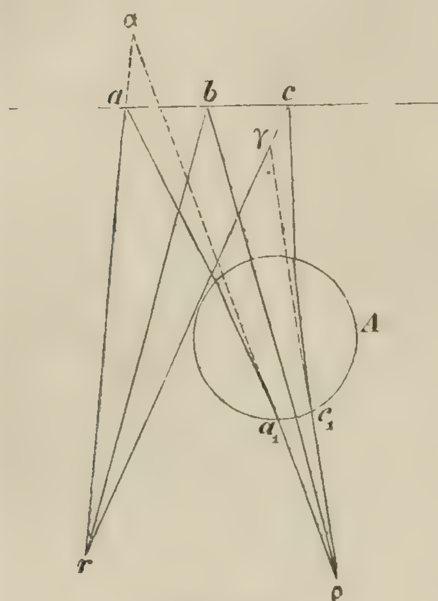


Fig. 191.

Ich habe noch einige Versuche angestellt über den Grad von Genauigkeit, der in der stereoskopischen Vergleichung der beiden Netzhautbilder erreicht werden kann. Zu dem Ende habe ich drei gleiche Nadeln senkrecht befestigt an dem Ende dreier vierkantiger kleiner Holzbalken, diese neben einander auf einen ebenen Tisch gelegt, so dass sich die drei Nadeln neben einander in Abständen von je 12 Millimetern und nahehin in derselben Ebene befanden. Ich stellte mich dann so auf, dass meine Augen sich in oder etwas unter der verlängerten oberen Ebene der drei Bälkchen befanden, und ich also die drei Nadeln sah, ohne die Begrenzungslinie desjenigen Endes der Holzbalken sehen zu können, an welchem die Nadeln befestigt waren. Die Entfernung meiner Augen von den Nadeln betrug 340 Millimeter. Unter diesen Umständen konnte ich nur mittels der Vergleichung der beiden Netzhautbilder erkennen, ob die Nadeln genau in einer verticalen Ebene sich befanden oder nicht. Waren sie es nicht, so konnten sie durch Verschiebung eines der Hölzer, in denen sie befestigt waren, in eine Ebene gebracht werden, so gut es der Beobachter eben erkennen konnte, und wenn man nachher das eine Auge in Richtung dieser Ebene brachte und nach den Nadeln hinblickte, konnte man leicht erkennen, in wie weit die Einstellung der Nadeln gelungen war. Es ist dabei zu bemerken, dass man die Abstände der Nadeln von einander nicht zu gross machen darf, weil sich dann eine eigenthümliche Täuschung des Urtheils einmischt, die im folgenden Abschnitt bei der Lehre vom Horopter besprochen werden soll. Für den Zweck sind die oben angegebenen Distanzen passend und machen jene Täuschung ohne Einfluss. Ich habe mich unter diesen Umständen nie, auch nur um eine halbe

Dicke der Nadeln, d. h. um $^1/_4$ Millimeter geirrt, wenn die Ebene der Nadeln senkrecht zur Gesichtslinie war. War dieselbe stark gegen die Gesichtslinie geneigt, so war die Vergleichung nicht ganz so sicher. Wenn eine Nadel um ihre eigene Dicke, also um $^1/_2$ Millimeter, vor oder hinter die Ebene der andern getreten war, war dies mit vollkommener Sicherheit zu erkennen. Man kann unter diesen Umständen leicht berechnen, um wieviel das Bild der mittleren Nadel verglichen mit denen der beiden äusseren in dem einen Auge anders lag, als in dem andern, wenn dieselbe $^1/_2$ Millimeter vor der Ebene der beiden anderen sich befand. Die Distanz meiner Augen beträgt 68 Millimeter. Auf die Ebene der beiden andern Nadeln projicirt, würde die Lage der mittleren Nadel in den beiden Netzhautbildern $\frac{1}{2} \cdot \frac{68}{340} = \frac{1}{10}$ Millimeter verschieden gewesen sein. Eine Breite von $\frac{1}{10}$ Millimeter auf 340 Mm. Distanz liegt schon an der Grenze der kleinsten sichtbaren Abstände. Sie entspricht einem Winkel von $60^1/_2$ Winkelsecunden, oder 0,0044 Millimeter Distanz auf der Netzhaut. Daraus folgt also, dass *die Vergleichung der Netzhautbilder beider Augen zum Zweck des stereoskopischen Sehens mit derselben Genauigkeit geschieht, mit welcher die kleinsten Abstände von einem und demselben Auge gesehen werden.*

Sehr kleine Unterschiede, herrührend von der verschiedenen Brechbarkeit verschiedenfarbiger Lichtstrahlen, kommen auch zur Wirkung nach einer Bemerkung von Brewster, wenn man durch eine Convexlinse von zwei bis drei Zoll Breite nach einem rothen und einem blauen Objecte hinsieht, die in gleicher Entfernung vom Beobachter sich befinden. Dann erscheint das rothe näher als das blaue.

Die stereoskopische Unterscheidbarkeit der Tiefendistanzen nimmt für entferntere Gegenstände schnell ab. Das mathematische Gesetz dafür hat eine ähnliche Form, wie das für die Bilder von Convexlinsen. Es sei r die Distanz des entfernteren Punktes vom Auge, ϱ die des näheren, und f eine Constante, von der die Genauigkeit abhängt, so ist die Tiefendistanz der Punkte unterscheidbar, wenn

$$\frac{1}{\varrho} - \frac{1}{r} \geqq \frac{1}{f}.$$

Nach den eben angeführten Messungen können wir den Werth von f gleich oder grösser als 240 Meter setzen. Setzen wir statt r den Abstand des Objects, statt ϱ den Abstand des Bildes von einer convexen Linse, deren negative Brennweite gleich f ist, so wird

$$\frac{1}{\varrho} - \frac{1}{r} = \frac{1}{f}.$$

Wenn man also irgend einen Gegenstand durch eine äusserst schwache Concavlinse von 240 Meter negativer Brennweite ansehen würde, so würde das Bild des Gegenstandes an der Stelle des entferntesten Objects liegen, welches stereoskopisch noch, als vor jenem ersten liegend, erkannt werden könnte. Wer

daran gewöhnt ist, die Lage der Linsenbilder zu übersehen, wird hierdurch gleich erkennen, dass in der Entfernung nur sehr grosse Tiefendimensionen, in der Nähe dagegen sehr kleine erkannt werden können.

Die Grösse f in dieser Formel bezeichnet die weiteste Distanz, in welcher ein Object stereoskopisch noch von unendlich weit dahinter gelegenen Gegenständen unterschieden werden kann.

Ueber die Energie, mit welcher die stereoskopische Vergleichung der Netzhautbilder die Vorstellung verschiedener Entfernung giebt, im Vergleich mit den übrigen Hilfsmitteln des Sehens, ist namentlich eine Abänderung des Stereoskops, das Pseudoskop, lehrreich. Dieses Instrument ist dazu bestimmt, die binocularen Bilder wirklicher Gegenstände so zu verändern, dass man falsche stereoskopische Reliefs davon erhält. Das Pseudoskop von Wheatstone enthält zwei rechtwinkelige Glasprismen, deren Kanten rechtwinkelig zur Visirebene gestellt sind, und durch welche der Beobachter in einer ihrer Hypotenusenfläche parallelen Richtung hindurchblickt. Es ist oben auf Seite 476 und in *Fig. 159* schon der Gang der Strahlen in einem solchen Prisma angegeben worden. Man sieht durch ein solches Prisma Objecte, die in Richtung des ihrer Hypotenusenfläche parallelen unabgelenkten Strahls liegen, an ihrem richtigen Orte, die rechts daneben befindlichen dagegen durch die Spiegelung nach links, die links befindlichen nach rechts verlegt. Da jedes Auge die Objecte in dieser Weise durch die Spiegelung symmetrisch umgelagert erblickt, so sind die Bilder beider Augen wieder mit einander in Uebereinstimmung. Die beiden Prismen werden übrigens in kurze Röhren eingesetzt, so dass ihre Hypotenusenfläche der Axe der Röhre parallel ist. Die Röhren müssen um ihre eigene Axe und um eine zur Visirebene senkrechte Axe drehbar sein, damit man die beiden Bilder in übereinstimmende Stellung bringen kann.

Dass dabei auch das stereoskopische Relief verkehrt werden muss, lässt sich leicht an einem einfachen Beispiele erkennen. Man denke sich als Object symmetrisch zu der Mittelebene des Kopfes gelegen einen viereckigen Balken. Beide Augen werden von diesem die vordere Fläche sehen, das rechte auch noch etwas von der rechten Seitenfläche, das linke etwas von der linken. Wenn man nun aber durch das Pseudoskop sieht, erscheint dem rechten Auge das, was es von der rechten Seitenfläche sieht, links neben der vorderen Fläche zu liegen. Das linke Auge sieht umgekehrt etwas von einer Seitenfläche rechts von dieser. Das kann nun an einem Balken nicht vorkommen, wohl aber an einer hohlen Rinne von viereckigem Querschnitt, welche an der dem Beobachter zugekehrten Seite geöffnet ist. In einer solchen würde das rechte Auge in der That ein verkürztes Bild der linken Seitenfläche sehen, das linke Auge eines der rechten. Dem entsprechend erscheint nun auch der Balken durch das Pseudoskop in der That als eine hohle Rinne. Ebenso erscheinen überhaupt convexe Körper als concav, nähere Gegenstände entfernter und so fort.

Die pseudoskopische Täuschung gelingt übrigens doch nur an einer kleinen Zahl von Gegenständen, weil ihr theils die Kenntniss der gewöhnlichen Formen, theils die Schlagschatten hindernd in den Weg treten. Ich habe schon früher hervorgehoben, dass die Schlagschatten immer unzweideutige Auskunft über

gewisse geometrische Verhältnisse geben. Der schattengebende Körper muss immer vor der beschatteten Fläche liegen. Wenn nun auf einer ebenen Fläche irgend ein hervorspringender Körper liegt, so wirft er seinen Schatten auf die Unterlage. Im Pseudoskop sollte er nun eigentlich hinter der Fläche liegend erscheinen, als wäre er in diese eingegraben. Dann hat aber der Schlagschatten keinen Sinn und stört die Möglichkeit der Täuschung. Ebenso hinderlich ist es, wenn eine vorliegende Fläche eine hinterliegende theilweise verdeckt. Dann sieht das rechte Auge an der rechten Seite der vorliegenden Fläche etwas mehr von der hinterliegenden als das linke, und das hat ebenfalls bei der pseudoskopischen Umkehrung keinen Sinn.

Die Körper, welche man pseudoskopisch sehen will, muss man deshalb im Allgemeinen frei im Raume aufstellen, vor einer entfernteren gleichmässig gefärbten Wand als Hintergrund, auf die sie keinen deutlichen Schlagschatten mehr werfen können, und die keine auffallenden Merkzeichen hat, die sich selbst als Gesichtsobject darböten. Ferner muss man vermeiden, dass ein Theil des Objects perspectivisch einen andern Theil theilweise deckt. Passende Objecte sind zum Beispiel Cylinder von beschriebenem oder gedrucktem Papier, von Holz etc., welche wie hohle Rinnen aussehen, Cigarren, welche wie ein hohles Tabaksblatt aussehen, Medaillen, von vorn beleuchtet, welche wie Siegel vertieft erscheinen. Sehr lebhaft finde ich die Täuschung bei der pseudoskopischen Betrachtung eines hohlen Glascylinders, der eine eingeätzte Theilung zur Abmessung von Flüssigkeiten trägt. Ist die Theilung dem Beschauer zugekehrt, so erscheint sie durch das Pseudoskop an der abgewendeten Seite des Cylinders. Auch verticale Drähte oder Fäden, die sich in verschiedener Entfernung vom Beobachter befinden, geben ein sehr geeignetes Object. Die näheren erscheinen durch das Pseudoskop entfernter, die entfernteren nahe.

Wo die Bekanntschaft mit der wirklichen Form der Objecte oder der Schlagschatten hindernd entgegentritt, gelingt es oft noch durch eine lebhafte Vorstellung der pseudoskopischen Form, wie sie erscheinen sollte, die Vorstellung derselben hervorzurufen; und wenn sie sich einmal gebildet hat, bleibt sie auch ohne Mühe bestehen. Andererseits kann man auch wohl wieder die Anschauung der wirklichen Form zurückrufen, doch fühlt man sich bei dieser durch die dazu nicht stimmenden Differenzen der beiden Netzhautbilder immer einigermassen beunruhigt und gestört.

Während das Pseudoskop das Relief der gesehenen Gegenstände umkehrt, wird es von dem Telestereoskop stärker hervorgehoben, als es in der natürlichen Anschauung geschieht, und das letztere Instrument ist deshalb besonders brauchbar, um an sehr entfernten Gegenständen, die im natürlichen Sehen keine oder nur eine sehr undeutliche stereoskopische Anschauung geben, das Relief deutlicher hervorzuheben. Für die Betrachtung sehr weit entfernter Gegenstände sind die menschlichen Augen nicht weit genug von einander entfernt, um zwei merklich verschiedene Bilder derselben zu geben, man muss also die Distanz der Gesichtspunkte künstlich vergrössern, um zwei hinreichend verschiedene Bilder zu erhalten. Dies geschieht im Telestereoskop mit Hilfe von

vier Planspiegeln, welche in *Fig. 192* bei a, b, α und β im Durchschnitt dargestellt sind. Die beiden Augen des Beobachters befinden sich bei r und ϱ. Die Linien

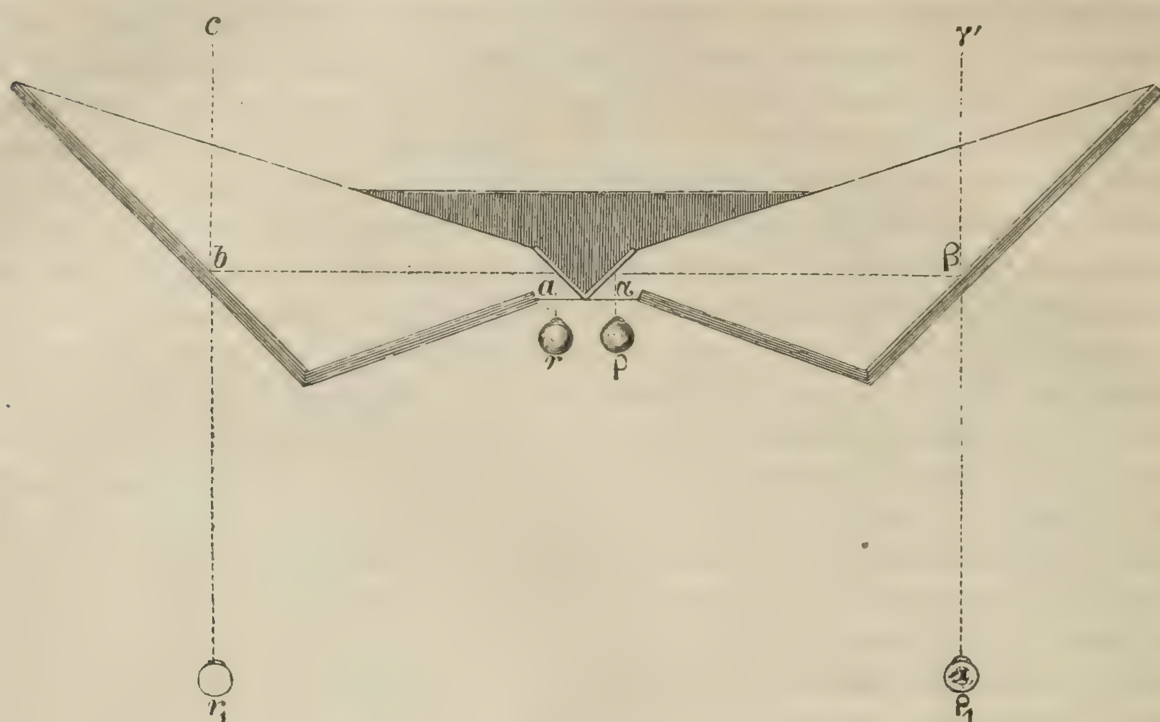


Fig. 192.

$c\,b\,a\,r$ und $\gamma\beta\alpha\varrho$ bezeichnen den Gang der Lichtstrahlen. Die vier Spiegel sind in einem Kasten, dessen Wände im Durchschnitt dargestellt sind, so befestigt, dass sie kleine Drehungen erlauben, um die Bilder zur Coincidenz zu bringen. Es genügt, wenn die Spiegel a und α rechtwinkelig zu einander und zur Basis des Kastens befestigt sind, dass der Spiegel β mittels einer Stellschraube um eine horizontale, und der Spiegel b durch eine andere Schraube um eine verticale Axe gedreht werden kann. Um ein grosses Gesichtsfeld zu haben, muss man die äusseren Spiegel möglichst gross machen.

Wenn r_1 den Ort des Spiegelbildes bezeichnet, welches das System der beiden Spiegel a und b vom Auge r entwirft, und ebenso ϱ_1 das Spiegelbild von ϱ, entworfen durch die Spiegel α und β, so sieht das Auge r mittels der beiden Spiegel die vorliegende Landschaft so, wie sie einem in r_1 befindlichen Auge ohne die Spiegel erscheinen würde; und das Auge ϱ sieht die Landschaft, wie sie von ϱ_1 aus erscheint. Da nun die Punkte r_1 und ϱ_1 viel weiter auseinanderliegen als die wirklichen Augen r und ϱ, so sind auch die Differenzen der beiden Bilder der Landschaft, wie sie von r_1 und ϱ_1 aus gesehen erscheinen würde, viel grösser, als die natürlichen Differenzen in beiden Augen, und demgemäss erscheint nun auch das stereoskopische Relief der entfernten Objecte, namentlich entfernter Bergzüge und Terrainformen, viel deutlicher als dem blossen Auge. Wenn die Spiegel so gestellt sind, dass unendlich entfernte Objecte durch das Telestereoskop mit parallelen Gesichtslinien gesehen werden, so erhält die Landschaft dadurch das Ansehen, als wenn der Beobachter nicht die natürliche Landschaft, sondern ein sehr zierliches und genaues Modell derselben vor sich hätte, welches im Verhältniss der Distanzen $r_1\varrho_1 : r\varrho$ (*Fig. 192*) verkleinert ist.

Etwas ähnliches wie das Telestereoskop leisten auch die meisten stereoskopischen Photographien von Landschaften, weil in der Regel der Abstand der beiden Gesichtspunkte auch bei der photographischen Aufnahme viel grösser gewählt wird, als die natürliche Distanz der Augen. Andererseits können mittels der Photographie stereoskopische Bilder selbst von Himmelskörpern, namentlich schön vom Monde, erhalten werden, wenn man zwei zu verschiedenen Zeiten aufgenommene Bilder combinirt, wobei die betreffenden Gestirne der Erde etwas verschiedene Seiten zugewendet haben. Obgleich der Mond der Erde im Ganzen fortdauernd dieselbe Seite zukehrt, so kommen doch kleine Schwankungen in seiner Stellung vor, welche es möglich machen von ihm stereoskopische Bilder zu erhalten, wenn man ihn in zwei verschiedenen Monaten photographirt, in solchen Augenblicken, wo die Beleuchtung desselben durch die Sonne genau dieselbe war. Solche Photographien geben nicht blos die Kugelgestalt unseres Trabanten deutlich wieder, sondern auch einzelnes von dem Relief seiner Ringgebirge.

Die Beurtheilung der absoluten Entfernung eines zweiäugig gesehenen Objects würde, wenn alle andern Mittel der Schätzung fehlen, vollzogen werden können mittels des Gefühls für den Grad der Convergenz, in die unsere auf das Object gerichteten Blicklinien sich stellen. Doch ist dieses Gefühl ziemlich unsicher und ungenau, und wir sind in dieser Beziehung unter Umständen ziemlich bedeutenden Täuschungen ausgesetzt.

Um zunächst zu erweisen, dass wir in der That die absolute Entfernung der gesehenen Objecte und demgemäss auch ihre Grösse nach der Convergenz der Blicklinien beurtheilen, so lange nicht andere hindernde Umstände dazwischentreten, dient der von WHEATSTONE angegebene Versuch. Dieser hatte sich sein Spiegelstereoskop so einrichten lassen, dass erstens die beiden Bilder den Spiegeln genähert und von ihnen entfernt werden konnten. Die parallelen Wände, an welchen die Bilder aufgestellt sind, sind auf Schlitten verschiebbar, die beiden Arme des Stereoskops aber drehbar um eine feste Axe, welche zwischen den Spiegeln liegt. Je näher die beiden Bilder den Spiegeln gebracht werden, desto grösser werden die beiden Retinabilder ohne Veränderung der Convergenz. Dabei nimmt die scheinbare Grösse des gesehenen Objects zu, ohne Veränderung seiner scheinbaren Entfernung. Lässt man dagegen die Bilder an den Armen des Instruments unverrückt, dreht aber die Spiegel um ihre mittlere Axe, so ändert sich die Convergenz, während die Grösse des Netzhautbildes unverändert bleibt. Dabei vermindern sich scheinbare Grösse und Entfernung des gesehenen Objects, wenn die Convergenz zunimmt.

Aehnliche Verkleinerung und Vergrösserung der Objecte lässt sich auch an jedem Paar stereoskopischer Zeichnungen beobachten, die man entweder mit blossen Augen oder mit dem Linsenstereoskope vereinigt, wenn man die Zeichnungen einander nähert oder von einander entfernt. Einen Apparat, um die nöthigen Messungen hierbei anstellen zu können, hat H. MEYER [1] angegeben.

WUNDT hat directe Versuche angestellt über die Schätzung der Entfernung

---

[1] Poggendorff's Annalen. LXXXV. S. 198—207.

nach dem Grade der Convergenz. Er blickte dabei nach einem schwarzen verticalen Faden, der vor einem entfernteren gleichmässig weissen Grunde sich abzeichnete, und zwar blickte er durch einen horizontalen gegen den Faden hin etwas röhrenförmig verlängerten Schlitz mit beiden Augen, so dass er nur den mittleren Theil des Fadens, nicht seine Enden sah, und auch von den seitlich gelegenen Gegenständen nichts, was ihm als Maasstab der Entfernung hätte dienen können. Der Faden war an einem horizontal in der Medianebene des Beobachters ausgespannten Drahte aufgehängt und verschiebbar. Zunächst suchte er die absolute Entfernung zu beurtheilen, und zu vergleichen mit der Länge eines in der Hand gehaltenen Maasstabes. Die Resultate in Centimeter angegeben, waren folgende:

Wirkliche Entfernung	Geschätzte Entfernung.
180	120
160	92
140	78
120	58
100	48
90	47
80	47
70	37
50	22
40	25

In allen diesen Fällen ist die geschätzte Entfernung kleiner gewesen, als die wirkliche. Ich habe eine ähnliche Versuchsreihe nach etwas abgeändertem Plane und mit dem entgegengesetzten Erfolge gemacht. Dicht vor das Gesicht in die Medianebene hielt ich ein Blatt steifen Papiers und blickte nach einem vertical herabhängenden Faden. Das Papier verdeckte dem rechten Auge alles, was sich links in einigem Abstande neben dem Faden befand, dem linken Auge, was sich rechts neben dem Faden befand. Näherte ich nun von der rechten Seite her einen Bleistift dem Faden, so sah ich diesen nur mit dem rechten Auge, nicht mit beiden. Ich versuchte dann mit dem Bleistift den Faden zu treffen, indem ich ihn schnell vorschob. Dann ging aber immer der Bleistift hinter dem Faden vorbei. Oeffnete ich die vorher geschlossenen Augen, nachdem ich meine Stellung verändert hatte, richtete sie auf den Faden und versuchte dann schnell ihn in der angegebenen Weise zu treffen, so war die Entfernung zwischen Bleistift und Faden gering. Wartete ich länger, indem ich fortdauernd den Faden fixirte, so wurde der Fehler immer grösser, wohl wegen steigender Ermüdung der inneren Augenmuskeln.

Sehr viel genauer war die Perception der Entfernungsänderung, wenn bei Wundt's Versuchen der Faden genähert oder entfernt wurde. Die kleinsten wahrnehmbaren Unterschiede waren hierbei in Centimetern:

Entfernung des Fadens vom Auge	Unterscheidungsgrenze für Annäherung	für Entfernung.
180	3,5	5
170	3	4
160	3	3
150	3	3
130	2	3
110	2	2
80	2	2
70	1,5	1,5
50	1	1

Bei 180 Centimeter Entfernung ist jedes Auge um 1° 1′ nach innen gewendet, und eine Annäherung des Fadens um 3,5 Centimeter entspricht einer Verschiebung jedes einzelnen Netzhautbildes um 72 Winkelsecunden. Diese Grösse ist schon an der Grenze des durch das Auge Unterscheidbaren. Bei den geringeren Abständen des Fadens werden dagegen erst grössere Winkelverschiebungen bemerkt; bei 50 Centimeter Abstand eine solche von 263 Secunden.

Uebrigens bleibt es bei diesen Versuchen wohl noch zweifelhaft, ob die beiden Augen dem Faden gefolgt und das Netzhautbild auf der Netzhaut ruhend geblieben ist, oder ob die Augen festgehalten wurden und die Verschiebung des Netzhautbildes bemerkt wurde. Die geringere Genauigkeit bei den stärkeren Convergenzen würde dann daraus zu erklären sein, dass bei vorhandener Convergenzanstrengung die Lage des Augapfels schwerer festzuhalten ist, als bei unangestrengter Parallelstellung.

Die Unvollkommenheit in der Beurtheilung der Entfernung des Fixationspunktes zeigt sich auch, wenn wir bei geschlossenen Augen einen Bleistift in einiger Entfernung vor unserem Gesicht halten und die Augen hinter den Augenlidern auf denselben hinzurichten suchen, so dass wir ihn fixiren, wenn wir bei unveränderter Augenstellung die Augen öffnen. Meist sind sie dann zu wenig convergent gestellt, und man sieht den Bleistift doppelt, wenn man sie öffnet. Doch gelingt es viel besser sie richtig einzustellen, wie ich schon oben bemerkt habe, wenn man die Spitze des Bleistifts betastet und daran mit der Fingerspitze reibt. Man erhält dann eine deutlichere sinnliche Vorstellung von seinem Orte, und dann gelingt es mir gewöhnlich die geschlossenen Augen so darauf zu richten, dass ich beim Oeffnen derselben keine Doppelbilder sehe.

Die Unsicherheit, mit der wir den absoluten Grad der Convergenz beurtheilen und danach die absolute Entfernung des fixirten Objects, macht sich in vielen Fällen merklich. Wenn man zum Beispiel ein Blatt Papier, auf dem stereoskopische Bilder gezeichnet sind, in der Hand hält und die Bilder combinirt, so erscheinen dieselben der Regel nach auf oder nahe vor der Fläche des Papiers, dessen Ort wir kennen, zu liegen, während doch die parallel oder nahe parallel gestellten Blicklinien sich erst in sehr grosser Entfernung hinter dem Papiere schneiden sollten, und dort der scheinbare Ort des körperlich erscheinenden Objects sein sollte. Ebenso gelingt es in der Regel nicht, negative Nachbilder eines hellen Objects zu einer körperlichen Anschauung zu combi-

niren; sondern sie erscheinen auf die Oberfläche desjenigen reellen Objects, auf welches die Augen gerade gerichtet sind, projicirt zu sein. Zuweilen indessen, wenn die Nachbilder recht scharf und deutlich sind, und wenn die vorliegende reelle Oberfläche keine hervortretende Zeichnung hat, gelingt es auch wohl das Nachbild mit körperlichen Dimensionen und selbständiger Lage im Raume zu erkennen.

Auch wenn man stereoskopische Zeichnungen im Stereoskop combinirt, wo man ausser ihnen keinen andern Gegenstand sieht, mit dem man die absolute Entfernung des erscheinenden Raumbildes vergleichen könnte, ist man ziemlich unsicher über die absolute Entfernung desselben; und wenn man die Lage des scheinbar gesehenen Objects mit der Hand ausserhalb des Kastens zu bezeichnen sucht, begeht man ähnliche Fehler, wie WUNDT sie bei der Schätzung der Entfernung des zweiäugig gesehenen Fadens fand. Blickt man dann abwechselnd über dem Instrumente hinweg und durch dasselbe, so kann man leicht die Lage der Hand mit der des stereoskopischen Raumbildes vergleichen und den Fehler schätzen, den man gemacht hat. Auch hierbei finde ich, wie WUNDT, dass ich meist geneigt bin, das Raumbild für näher zu halten, als es ist. Sehr viel besser als mit der nach dem Gefühl bestimmten Lage der nicht gesehenen Hand pflegt dagegen die Vergleichung mit einäugig rechts und links vom Stereoskop gesehenen Objecten zu gelingen. Die Kästen der BREWSTER'schen Stereoskope sind meistens nicht so breit, dass man nicht mit dem rechten Auge einige von den rechts liegenden reellen Objecten, mit dem linken links liegende sehen könnte, deren Entfernung und Grösse bekannt ist. Trotzdem man diese nur einäugig sieht, und trotzdem die Entfernung des stereoskopischen Raumbildes nur durch das zweiäugige Sehen bestimmt wird, macht man meist ziemlich genaue Bestimmungen, die nicht viel geändert werden, wenn man nachher das Raumbild mit zweiäugig über oder unter dem Stereoskop gesehenen reellen Objecten vergleicht.

Dieses letztere Verfahren zeigt, dass die Beurtheilung der Entfernung nach der Convergenz der Gesichtslinien unter günstigen Umständen und wenn sie durch keinerlei beirrende Einflüsse gestört wird, ziemlich gute Resultate giebt. Aber es ist eines derjenigen Momente der Beurtheilung, welches leicht überwogen wird durch andere, die ihm widersprechen, wie in dem vorher citirten Beispiele der Bilder, die sich auf eine Fläche von bekannter Entfernung projiciren.

Auch die sogenannten Tapetenbilder[1] zeigen unzweideutig den Einfluss der Convergenz. Wenn man nämlich nach einer Tapete, deren Muster sich gleichmässig wiederholt, mit convergenten Blicklinien hinsieht, so gelingt es bei gewissen Graden der Convergenz entsprechende Theile des Musters zur Deckung zu bringen, entweder das erste mit dem benachbarten zweiten, oder auch das erste mit dem dritten oder vierten. Man sieht alsdann ein verkleinertes Bild der Tapete, welches, dem Beobachter näher, scheinbar in der Luft schwebt, desto näher und kleiner, je grösser die Convergenz ist. Wenn hierbei

[1] H. MEYER in ROSER und WUNDERLICH Archiv. 1842. Bd. I. — D. BREWSTER in *Philos. Magaz.* XXX, 305.

jeder Theil des Musters sich mit nächstbenachbarten gleichen deckt, ist das Bild nicht so klein und nah, als wenn er sich mit dem dritten oder vierten gleichen deckt.

Dahin gehört auch der Fall, wo stereoskopische Bilder vereinigt werden, deren correspondirende Punkte weiter von einander entfernt sind als die Mittelpunkte der Augen, die also nur bei divergenter Richtung der Blicklinien vereinigt werden können. Beobachter, welche wenig in der Erzeugung divergenter Augenstellungen geübt sind, erreichen dies am besten, wenn sie zwei zusammengehörige stereoskopische Zeichnungen auseinander schneiden, sie dann in ein gewöhnliches Stereoskop einlegen und sie nun langsam von einander entfernen, während sie sie fortdauernd vereinigt zu sehen suchen. Oder man zeichnet, wie Rollet [1] und Becker thaten, unter einander auf einem Papier eine Reihe von stereoskopischen Figuren, die einander einzeln congruent sind, aber immer weiter auseinander rücken. Die genannten Beobachter haben eine Reihe von Figuren gegeben, deren jede einzelne einen grösseren Kreis, vor dessen Fläche ein kleinerer liegt, stereoskopisch darstellen. Die Mittelpunkte der kleinen Kreise des nächstfolgenden Paars sind immer so weit von einander entfernt, wie die der grossen des vorausgehenden Paars. Hat man also die letzteren vereinigt, so vereinigen sich auch die kleinen Kreise des nächsten Paars von selbst; von denen gelangt man zur Vereinigung der grossen dieses selben Paars, von diesen zur Vereinigung der kleinen eines dritten Paars und so fort. Die Mittelpunkte des ersten Paars kleiner Kreise sind 44 Millimeter distant, die der letzten grossen 93 Millimeter, und doch kann ich bei einer Augendistanz von 68 Millimeter auch die letzteren in 30 Centimeter Abstand vereinigen.

In solchen Fällen können sich die Blicklinien nun in gar keinem Punkte des vor uns gelegenen Raums schneiden, sondern nur hinter unserem Kopfe, und dennoch glauben wir ebenso gut, wie bei richtiger Distanz der Bilder, ein stereoskopisches Raumbild vor uns zu haben. Höchstens werden wir durch das Gefühl ungewöhnlicher Anstrengung unserer Augen benachrichtigt, dass dieselben eine ungewöhnliche Stellung haben. Und wenn wir ein stereoskopisches Raumbild, welches mit divergenten Sehaxen betrachtet wird, vergleichen mit reellen sehr entfernten Objecten, die über dem Stereoskop sichtbar sind, einer weit entfernten Bergkette zum Beispiel, so erscheint uns jenes Raumbild nur eben noch sehr viel weiter entfernt, als die entferntesten reellen Objecte.

Auch wenn wir reelle ferne Objecte durch zwei Prismen ansehen, von etwa vier Grad brechendem Winkel, deren brechende Kanten nach aussen gekehrt sind, so müssen wir sie mit divergenten Gesichtslinien betrachten, und sie erscheinen uns wohl etwas entfernter, als mit blossen Augen, im Ganzen aber doch nicht viel anders. Das unendlich Entfernte macht sich in unseren Gesichtsanschauungen eben nicht geltend als eine Grenze, die nicht überschritten werden könnte. Abnehmende Convergenz der Gesichtslinien ist für uns Zeichen wachsender Entfernung des Objects. Diesem Zeichen gemäss urtheilen wir

---

[1] Wiener Sitzungsberichte. 10. Mai 1861. Bd. XLIII. — Combination bei divergenten Gesichtslinien auch schon früher ausgeführt durch Burckhardt in Verhandl. d. naturforsch. Ges. zu Basel. I, 145.

auch, wenn die Convergenz bis zu negativen Werthen abnimmt, obgleich dann kein vor uns liegender reeller Raumpunkt solcher Convergenz mehr entspricht. Selbst wenn wir durch das Gefühl mehr oder weniger sicher wahrnehmen sollten, dass wir mit einer Augenstellung sehen, die bei der normalen Betrachtung wirklicher Objecte nie vorgekommen ist, so würden wir den Eindruck nach der Regel, der wir bei abnormen Sinneseindrücken zu folgen pflegen, doch immer nur vergleichen können demjenigen, welcher ihm am ähnlichsten ist und sich nur durch geringere Convergenz der Gesichtslinien davon unterscheidet, dem Eindruck weit entfernter reeller Objecte auf das Auge.

Wegen der Unvollkommenheit, mit der wir den Grad der Convergenz beurtheilen, können nun auch Täuschungen in der Beurtheilung der zweiäugig gesehenen Raumformen vorkommen, indem wir eine Interpretation der Gesichtserscheinungen machen, welche für eine andere Convergenz passend wäre, aber nicht für die wirklich stattfindende richtig ist. Am auffallendsten ist dies an solchen Gegenständen, deren Netzhautbilder bei verschiedenen Graden der Convergenz gleich guten Sinn haben würden. Man befestige zum Beispiel an einem hoch über und vor unserem Auge gelegenen horizontalen Querbalken in einigen Zollen Entfernung von einander drei Nägel, hänge an diesen drei feine schwarze Seidenfäden mittels loser weiter Schleifen auf und spanne sie durch kleine Gewichte. Zunächst richte man die Fäden so, dass alle drei in einer Ebene hängen. Dann setze man sich gerade vor die Fäden um Armeslänge von ihnen entfernt, so dass der mittlere in der Medianebene des Gesichtes liegt und die Ebene der Fäden senkrecht zu dieser Medianebene sei. Hinter den Fäden muss sich in grösserer Entfernung ein gleichmässig gefärbter Grund ohne besonders markirte Punkte befinden. Man betrachte die Fäden aufmerksam, ob sie wohl wirklich in einer Ebene zu liegen scheinen; es zeigt sich dann, dass der mittlere scheinbar vor der Ebene der beiden andern sich befindet, desto mehr je näher man das Gesicht den Fäden bringt. Nun schiebe man den mittleren Faden etwas zurück, so dass die Fäden in einer gegen den Beobachter concaven Cylinderfläche liegen, und setze sich wieder davor. Betrachtet man sie nun aus grösserer Entfernung, so erscheinen sie in einer gegen den Beobachter concaven Fläche zu liegen; nähert man sich mehr, so wird diese eben, endlich bei noch grösserer Annäherung tritt der mittlere Faden, obgleich er hinter der Ebene der beiden andern liegt, scheinbar vor die Ebene der beiden andern nach vorn heraus. Die Entfernung, aus der die Fäden als eine Ebene erscheinen, ist für verschiedene Beobachter sehr verschieden. Herr E. Hering, der diesen Versuch durch Anwendung von Fäden verbessert hat, nachdem ich ihn schon zuvor mit Nadeln in der oben beschriebenen Weise ausgeführt hatte, findet, dass er sich um die ganze Länge des Durchmessers des durch die Fäden zu legenden geraden kreisförmigen Cylinders entfernen müsse, um die Fäden in einer Ebene zu sehen, und bringt dies mit seiner Horoptertheorie in Zusammenhang, wovon weiter unten mehr. Ich selbst sehe aus einer solchen Entfernung die Fläche der Fäden noch deutlich concav gegen mich hin, ebenso die Herren Dr. Berthold, Dr. Bernstein und Dr. Dastich, die in meinem Laboratorium darüber Versuche anstellten. Die Herren Berthold und Dastich mussten

sich bis etwa zur Hälfte jenes Durchmessers nähern, ich selbst noch mehr, nämlich auf etwa $^3/_{10}$, ehe ich die Fäden in einer Ebene erblickte; am nächsten musste Herr Dr. Bernstein herangehen. Das Verhältniss blieb für verschiedene Entfernungen der Fäden von einander und für verschiedene Abstände des mittleren Fadens von der Ebene der beiden andern ziemlich dasselbe, so dass Herr Dr. Berthold die Fäden immer dann nahehin eben sah, wenn seine Nasenwurzel etwa in der Axe des Cylinders sich befand, der durch die Fäden zu legen ist, ich selbst aber immer bis nahe, aber nicht ganz zur Mitte des Radius, oder bis auf ein Viertel des Durchmessers herangehen musste.

Dabei zeigte sich auch ein Einfluss der Ermüdung der Augen, indem nämlich beim ersten Uebergang aus paralleler Richtung zur Convergenz auf die Fäden der Fehler in der Beurtheilung ihrer Lage kleiner ausfällt, und man näher heran zu gehen geneigt ist, um sie eben zu sehen. Bei länger andauernder Convergenz aber tritt dann der mittlere Faden etwas vor, und man muss wieder weiter zurückgehen.

Hier sind einige Beobachtungsresultate für mein Auge bei längerer Betrachtung erhalten; die Maasse sind Millimeter:

Abstand der beiden äusseren Fäden von einander	Abstand des mittleren von der Ebene der beiden andern	Durchmesser des Cylinders	Distanz, von der ich die Fäden in einer Ebene sah	Distanz in Theilen des Durchmessers.
256	10,5	1571	450	0,286
256	6	2737	730	0,267
117	4,2	819	237	0,289
117	8,1	429	129	0,301
120	2	1802	550	0,305

Die Täuschung bei diesen Versuchen erklärt sich aus der oben bemerkten Thatsache, dass, wenn wir nur nach der Convergenz der Gesichtslinien die Entfernung beurtheilen, wir dieselbe gewöhnlich für kleiner halten, als sie wirklich ist, und sie überhaupt unsicher beurtheilen.

Wenn wir nun auf eine senkrechte durch senkrechte parallele Linien eingetheilte Ebene blicken, so erscheinen die nach rechts hin gelegenen Streifen derselben dem rechten Auge unter grösserem Gesichtswinkel als dem linken, weil sie erstens jenem Auge näher sind, und weil zweitens seine Gesichtslinie die genannten Streifen unter einem weniger spitzen Winkel trifft, als die des linken Auges. Umgekehrt erscheinen die nach links gelegenen Streifen dem linken Auge breiter, als dem rechten. Je näher die Augen der besagten Ebene kommen, desto grösser werden die Differenzen der Gesichtswinkel für den gleichen Streifen. Um nun entscheiden zu können, ob die wahrgenommenen Differenzen dieser Art der Projection einer ebenen Fläche oder einer gekrümmten angehören, müsste man die Entfernung des Objects nach der Convergenz der Gesichtslinien sehr genau schätzen können. Denn die gleichen Differenzen der beiderseitigen Bilder würde auch ein entfernteres Object zeigen können, wenn es gegen den Beobachter convex wäre, oder ein näheres, wenn es gegen den Beobachter concav wäre. Dass wir nun das gesehene zweiäugige Bild bei den beschriebenen Versuchen so interpretiren, als gehörte es einem entfernteren

Objecte an, rührt, wie ich glaube, nicht oder wenigstens nicht allein davon her, dass wir die Entfernung des Objects unter ähnlichen Umständen meist als zu gross schätzen, wie die oben beschriebenen Versuche bei dem Zielen mit dem einäugig gesehenen Bleistift auf den zweiäugig gesehenen Faden zeigen; denn in der That müsste der Irrthum über die Entfernung grösser sein, als er wirklich sich bei jenen Versuchen herausstellt, wenn er die gleiche Aenderung in der scheinbaren Form des Raumbildes geben sollte. So würden wir in dem ersten Falle der auf Seite 655 gegebenen Beobachtungen die Entfernung auf 627 Millimeter statt auf 450, in dem dritten auf 350 statt auf 237 schätzen müssen. So gross habe ich die Irrthümer nie gefunden. Ich glaube vielmehr, dass wir hier eine falsche Auslegung machen, weil ein anderer Umstand wegfällt, der sonst unser Urtheil unterstützt. Wenn wir nämlich nicht blos gleichmässig fortlaufende gerade Linien in ähnlicher Lage wie die Fäden bei dem zuletzt beschriebenen Versuche vor Augen haben, sondern Linien, welche deutlich sichtbare Merkpunkte darbieten, oder Objecte, an denen auch horizontale Grenzlinien vorkommen, so erscheinen uns die verticalen Längen, welche dem rechten Auge näher liegen, unter grösserem Gesichtswinkel, als dem linken Auge und umgekehrt.

Dass diese Unterschiede in den verticalen Dimensionen für beide Augen in Betracht kommen, zeigt evident die Vergleichung der stereoskopischen Figuren auf *Taf. VI A* und *B*. Das Figurenpaar *A* zeigt die beiden Projectionen einer nahe vor dem Gesicht befindlichen, schachbrettartig gemusterten Ebene und erscheint als Ebene. Das Paar *B* dagegen zeigt die beiden Projectionen einer schachbrettartig gemusterten, weit entfernten und cylindrisch gekrümmten Fläche und erscheint als solche. Nun sind die verticalen Linien in dem einen Paar Zeichnungen genau so weit von einander entfernt, wie die entsprechenden verticalen Linien in dem andern Paare von Zeichnungen. Wenn also die scheinbare Krümmung nur von der gegenseitigen Lage der verticalen Linien abhinge, wie man bisher meist vorausgesetzt hat [1], so müssten beide Zeichnungen genau dieselbe Flächenkrümmung darbieten. An und für sich entspricht die relative Lage der verticalen Linien aber ebenso gut einem nahe liegenden ebenen, wie einem entfernteren convexen Schachbrett, und erst die Führung der queren Linien giebt für die eine oder andere Deutung den Ausschlag. Umgekehrt sind in *Taf. VI Fig. C* die horizontalen Distanzen der Verticallinien überall gleich gross, die begrenzenden Querlinien aber gekrümmt und am äussern Rande der Figuren weiter von einander entfernt, als am innern, wie es in den Bildern einer nahen concaven Fläche der Fall sein würde. Aus der Combination beider Zeichnungen entsteht auch wirklich das binoculare Bild einer gegen den Beobachter concaven Fläche, trotz paralleler Stellung der Blicklinien, die einem nahen Objecte nicht entspricht. Wenn wir hier nur nach den Unterschieden in horizontaler Richtung urtheilen wollten, die ganz fehlen, so müsste *C* als ein ebenes Schachbrett erscheinen. Die unpassende Convergenz stört hier ebenso wenig, wie bei der Betrachtung der Doppelzeichnung *A Taf. VI*, wo wir urtheilen,

---

[1] Und wie es namentlich Herr E. Hering als Grundgesetz des binocularen Sehens ausgesprochen hat.

dass wir eine nahe ebene Fläche vor uns haben, trotzdem die dazu nöthige Convergenz fehlt. Die Aehnlichkeit der beiden Bilder *A* mit denen einer nahen Ebene entscheidet unsere Deutung trotz des Gefühls unpassender Convergenz.

Wenn man nun die Bilder so wählt, dass Verschiedenheiten in den verticalen Dimensionen für beide Augen gar nicht vorkommen können, also zum Beispiel wie in dem oben besprochenen Versuche drei verticale Fäden, ganz gleichmässig fortlaufend und ohne Merkpunkte, betrachtet, so fällt ein Theil derjenigen Zeichen fort, an denen wir sonst die Nähe der Bilder erkennen. Die Differenzen, welche die horizontalen Abstände der Fäden in den beiden Netzhautbildern zeigen, sind nicht begleitet von den sonst immer gleichzeitig vorkommenden entsprechenden verticalen Differenzen, oder wenigstens sind letztere nicht wahrnehmbar, und da wir in der Beurtheilung der Nähe durch Convergenz nicht sehr sicher sind, so beurtheilen wir die drei Fäden wie ein Object, welches etwas ferner ist, und an dem alsdann die vorhandenen Differenzen der horizontalen Dimensionen nur vorkommen können, wenn es gegen den Beobachter convex ist.

Da bei verschiedenen Individuen die Sicherheit der Beurtheilung der Entfernung durch Convergenz sehr verschieden ist, so erklärt es sich, dass die Täuschung an den drei verticalen Fäden bei verschiedenen Individuen sehr verschiedenes Maass hat. Bei Herrn E. Hering ist die Täuschung am meisten entwickelt; bei demselben scheint aber auch die Beurtheilung der Entfernung nach der Convergenz der Gesichtslinien besonders unvollkommen zu sein, da er sie nach seinen eigenen Beobachtungen ganz zu läugnen geneigt ist.

Zur Prüfung der gegebenen Erklärung habe ich auf die drei schwarzen Fäden kleine Goldperlen aufgezogen und dieselben in Zwischenräumen von etwa vier Centimeter von einander befestigt. Sie dienten als Merkpunkte an den Fäden, die auch im indirecten Sehen deutlich sichtbar waren. Die oben beschriebene Täuschung war danach bis auf einen geringen Rest geschwunden. Während ich bei drei ganz schwarzen Fäden, deren äussere 256 Millimeter von einander entfernt waren, und die aus 450 Millimeter Entfernung betrachtet wurden, den mittleren 10,5 Millimeter hatte zurückschieben müssen, um sie eben zu sehen, brauchte ich ihn nach Anbringung der Perlen nur 2 Millimeter zurückzuschieben. Bei 120 Millimeter Abstand der äusseren Fäden, wobei der mittlere 2 Millimeter zurückgeschoben war, musste ich früher 550 Millimeter abgehen, nach Anbringung der Perlen nur 230 Millimeter.

Auch wenn man den drei schwarzen Fäden irgend einen andern Gegenstand nahe bringt, der hinreichend viele Merkpunkte darbietet, so erkennt man die Krümmung der Fläche, in der die Fäden hängen, selbst wenn der genäherte Gegenstand an sich gar keine geraden Linien zur Vergleichung darbietet. Ich benutzte dazu zum Beispiel einen *S* förmig gekrümmten ausgeschnitzten Papierschneider, und selbst wenn ich seinen am stärksten gekrümmten Rand den Fäden zuwendete, liess er die Täuschung über deren Stellung fast ganz schwinden.

Da es sehr schwierig ist, ausser durch Maschinen eine hinreichend genaue Uebereinstimmung der verticalen Linien in stereoskopischen Bildern hervorzubringen, habe ich Versuche über den Einfluss der Convergenz noch in folgender Weise angestellt. Ich habe zwei rechtwinkelige Prismen neben einander be-

festigt, so dass ihre Querschnitte wie die rechtwinkeligen Dreiecke in *Fig. 195* liegen, dass ihre Kanten einander parallel und zwei ihrer Kathetenflächen unter einem kleinen Winkel α gegen einander geneigt sind. Trifft der Strahl af bei b nahehin senkrecht auf eine Kathetenfläche solcher Prismen, so wird der Strahl zwei Mal bei c und d reflectirt, wie die Figur anzeigt, und tritt schliesslich aus der letzten Fläche in der Richtung eg von seiner ersten Richtung aus um einen Winkel abgelenkt, der das Doppelte des Winkels α beträgt [1]. Wenn man in der angegebenen Weise durch ein solches Doppelprisma bei senkrechter Stellung seiner Kanten blickt, so sieht man genau dasselbe Netzhautbild, wie mit blossem Auge, aber um es zu sehen, muss man das Auge etwas mehr nach rechts oder links wenden, als es ohne das Prisma nöthig wäre.

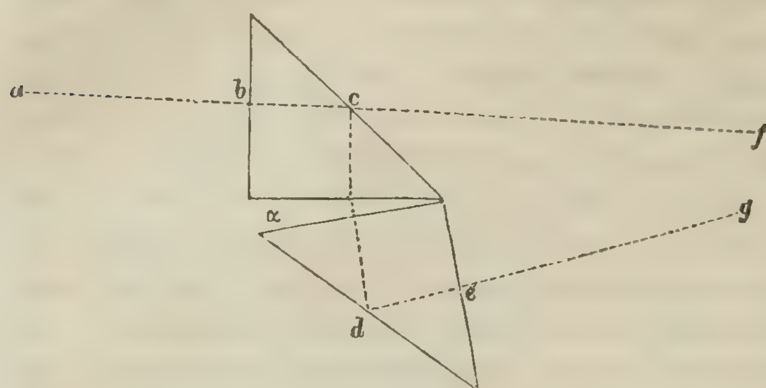


Fig. 195.

Blickt man durch ein solches Prisma nach drei parallelen verticalen Fäden, die in einer Ebene sich befinden und deren mittelster daher den unbewaffneten Augen ein wenig vor die Ebene der beiden andern vorzutreten scheint, so muss man die Augen, je nachdem man die Fläche b oder e des Prisma ihm zukehrt, mehr convergiren oder mehr divergiren lassen, als vorher, sieht aber genau dieselben Netzhautbilder. Im Falle die Divergenz vergrössert wird, erscheint der mittlere Faden noch stärker vortretend als bisher; im Falle die Convergenz vermehrt wird, tritt er in die Ebene der andern scheinbar zurück, oder sogar hinter dieselbe. Da die Prismenzusammenstellung eine ganz geringe telestereoskopische Wirkung hat, so bringe man für Convergenz die Fläche e vor das rechte, für Divergenz b vor das rechte Auge; oder man bringe nach einander beide Flächen vor das linke Auge; die telestereoskopische Wirkung des kleinen Apparats ist in den ersten beiden Fällen gleich, wo der Abstand der Gesichtspunkte durch die Prismen vergrössert wird, und ebenso in den letzteren beiden Fällen, wo dieser Abstand verkleinert wird.

Aus diesem Versuche folgt, dass dieselben Netzhautbilder die Vorstellung eines concaven, ebenen oder convexen Objects hervorbringen, je nachdem die Convergenz der Augen grösser oder kleiner ist, dass also die Convergenz bei solchen Objecten wohl beachtet wird.

Andererseits betrachte man durch die Prismencombination eine ebene mit deutlich sichtbaren Figuren oder Buchstaben bedeckte Fläche, deren Netzhautbilder daher nur bei einem bestimmten Convergenzgrade einem wirklichen Objecte

---

[1] Es ist hierbei keine Verzerrung des Bildes durch die Brechung an den Glasflächen zu fürchten, wie sie bei schiefwinkeligen Prismen vorkommt und bei stereoskopischen Versuchen sehr störend werden kann, weil die Veränderungen nur derselben Art sind, wie sie beim Sehen senkrecht durch eine dicke planparallele Glasplatte vorkommen; in der Mitte des Bildes verschwindend klein und nach den Seiten hin symmetrisch, so dass sie bei den hier zu machenden Versuchen nicht stören können.

entsprechen können, so wird man dieselbe auch bei vermehrter oder verminderter Convergenz eben sehen. In einem solchen Falle können die Netzhautbilder nur einem bestimmten Objecte angehören, und die Anschauung dieses Objects entsteht auch bei unpassender Convergenz. Aehnlich verhält es sich bei den Fäden mit Perlen; auch da ist die Wirkung der vermehrten Convergenz und Divergenz sehr unbedeutend, und man beobachtet hauptsächlich nur die telestereoskopische Wirkung der scheinbar vermehrten Distanz der Gesichtspunkte.

Ganz anders wirken die gewöhnlichen einfachen Prismen von schwachem brechenden Winkel. Wenn man durch die Mitte eines solchen unter dem Minimum der Ablenkung blickt, die brechende Kante der Nase zugekehrt, so erscheinen alle Objecte nach innen abgelenkt und erfordern erhöhte Convergenz zu ihrer Betrachtung. Aber gleichzeitig erscheinen alle Verticallinien nasenwärts concav, die schläfenwärts gelegenen Theile des Bildes zu schmal, die nasenwärts gelegenen zu breit, Horizontallinien dagegen nach der Nasenseite divergirend. Daraus folgt, dass, wenn das rechte Auge durch ein solches Prisma blickt, die Objecte zweiäugig gesehen, näher erscheinen und so, dass sowohl ihre geraden Horizontallinien wie ihre geraden Verticallinien gegen den Beschauer concav erscheinen. Durch die scheinbare Vergrösserung der verticalen Abstände an der inneren Seite werden die Unterschiede der natürlichen Projection, wonach die jenseits der Medianebene gelegenen Theile des Objects scheinbar kleiner sind, zum Theil oder ganz ausgeglichen. Das Object erscheint ungefähr in derselben Entfernung wie vorher, oder auch trotz der vermehrten Convergenz etwas grösser und ferner. Unter diesen Umständen kann die Verbreiterung der nasenwärts gelegenen und Verschmälerung der schläfenwärts gelegenen Theile des Bildes nur auf eine concave Wölbung desselben bezogen werden. Die Krümmung der Verticallinien bedingt die scheinbare Concavität derselben.

Kehrt man die scharfe Kante des Prisma nach aussen, so erscheinen ebene Objecte im Gegentheil convex gegen den Beobachter.

Mit den hier betrachteten Erscheinungen, wobei zweiäugig Bilder von Objecten bei bald vermehrter, bald verminderter Convergenz der Augen betrachtet werden, hängt auch die Möglichkeit zusammen, *Reliefbilder* der Objecte zu construiren, welche bei geringerer Entfernung und bei geringeren Tiefendimensionen als das Original doch den Eindruck des letzteren nach seinen wirklichen Formen und Dimensionen, seiner wirklichen Beschattung, und zwar nicht nur für monoculare, sondern selbst für binoculare Betrachtung nachahmen, indem sie annähernd auch dieselben Unterschiede beider Netzhautbilder herstellen, wie sie die Betrachtung des Originals selbst ergeben würde. Eben deshalb ist ein Reliefbild aus dem richtigen Standpunkte angesehen eine sehr viel vollkommenere Art der Nachahmung, wenigstens der Form des Objects, als es das vollkommenste ebene Bild je sein kann. Es gehören dahin nicht nur die Basreliefs und Hautreliefs der Sculptur, welche menschliche Köpfe, Figuren und Figurengruppen darstellen, sondern auch Theaterdecorationen, welche Landschaften oder Zimmer, Kirchenportale, welche perspectivisch verkürzte Säulenhallen darstellen u. s. w.

Man kann die empirisch von den Künstlern [1] gefundenen Regeln der Reliefconstructionen aus einem einfachen stereoskopischen Versuche herleiten. Man bringe eine stereoskopische Doppelzeichnung, deren beide Bilder aber auf getrennten Papierstücken ausgeführt sind, zunächst in solcher Lage zur Vereinigung, dass sie bei richtig gewähltem Convergenzgrade der Augen gerade denselben Anblick wie das Orginal gewähren. Dann nähere man beide Bilder einander, aber so, dass beide in derselben Ebene bleiben. Dabei wächst die Convergenz der Gesichtslinien, während die Netzhautbilder der beiden Bilder keine, oder wenigstens nur unverhältnissmässig kleine Veränderungen erleiden, und der sinnliche Eindruck bleibt also, abgesehen von der verhältnissmässig undeutlichen Wahrnehmung der vermehrten Convergenz, fast derselbe wie zuvor. Denken wir uns nun das Object construirt, welches in der neuen Lage der Bilder diesen entsprechen würde, so ist dieses ein Reliefbild des Originalobjects. An dem Relief ist zu unterscheiden eine Hauptebene (Ebene des Hintergrundes), in die alle die unendlich weit entfernten Punkte des Originals zu liegen kommen, und eine ihr parallele Congruenzebene, in der die Punkte liegen, die mit ihrem Bilde zusammenfallen. Wenn das Relief dem Beschauer das Original in natürlicher Grösse darstellen soll, muss die Congruenzfläche durch die Augen des Beschauers gehen. Will man dagegen den Anblick des Originals nicht in natürlicher Grösse, sondern den eines verkleinerten oder vergrösserten Modells desselben wiedergeben, so kann die Congruenzfläche auch anders gelegt werden, so dass der Gesichtspunkt, welcher den Mittelpunkt beider Augen des Beobachters repräsentirt, nicht in ihr liegt.

Alle Ebenen des Originals bleiben im Reliefbild Ebenen, alle geraden Linien bleiben gerade Linien.

Alle Ebenen des Originals und alle geraden Linien, die der Congruenzfläche parallel sind, bleiben dieser und sich selbst parallel auch im Relief.

Alle anderen einander parallelen Ebenen des Originals schneiden sich im Relief in einer geraden Linie des Hintergrundes.

Alle parallelen Geraden des Originals, die nicht der Congruenzfläche parallel sind, schneiden sich in einem Punkte des Hintergrundes.

Alle Ebenen und Geraden, die durch den Gesichtspunkt gehen, behalten ihre Lage bei auch im Reliefbild.

Endlich, wenn f und φ die Abstände beziehlich eines Punktes des Originals und seines Bildes von der Congruenzfläche bezeichnen und g den Abstand des Hintergrundes von der Congruenzfläche, so ist

$$\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{f} = \frac{1}{g}$$

die Gleichung, welche den Abstand φ giebt; dieselbe, welche den Abstand des Bildes φ von einer Concavlinse von der Brennweite $-g$ ergeben würde.

Ganz wie in den Bildern einer solchen werden die Bilder entfernter Gegenstände sehr nahe zusammengerückt, während die von näheren Objecten

[1] J. A. Breysig Versuch einer Erläuterung der Reliefsperspective. Magdeburg 1798.

relativ grössere Tiefendimensionen erhalten. Eine Concavlinse zeigt also ein richtig construirtes Reliefbild der durch sie gesehenen Objecte.

Wenn man die Congruenzebene und die Ebene des Hintergrunds zusammenfallen lässt, so wird aus dem Reliefbild ein perspectivisches ebenes Bild.

In den Reliefbildern werden gleich gut wahrnehmbare Theile der Tiefendimensionen dargestellt durch gleich grosse Tiefenunterschiede; und in diesem Sinne können wir sagen, dass wir die objective Welt binocular wie in einem Reliefbild sehen. Wie in einem solchen sind selbst grosse Abstände sehr entfernter Gegenstände von einander, in Richtung der Tiefe genommen, nur sehr schwach wahrnehmbar, während selbst kleine Tiefenabstände naher Objecte deutlich ausgedrückt sind.

Schliesslich habe ich noch gewisse Fehler zu besprechen, welche bei der Beurtheilung von Linienrichtungen beim zweiäugigen Sehen eintreten, und auf welche E. Hering aufmerksam gemacht hat. Wenn man nämlich nach einem langen vertical hängenden Faden hinsieht, der sich vor einer entfernteren gleichmässig angestrichenen Wand befindet, welche keine deutlich sichtbaren Merkpunkte oder Linien darbietet, nach denen man sich über die Lage der Verticale oder Horizontale orientiren könnte, den Faden selbst aber so lang macht, dass man seinen oberen und unteren Endpunkt nicht sehen kann, oder aber ihn durch einen Hohlcylinder von der Breite des Gesichts hindurch betrachtet, der den Anblick seiner Enden und seitlicher Gegenstände ausschliesst, so kann man bei zweiäugiger Betrachtung doch noch beurtheilen, ob der Faden wirklich vertical sei oder nicht, und wenn er nicht vertical erscheint, ihn durch Verschiebung seines unteren Endes vertical zu machen suchen. Dabei zeigt es sich, wie ich übereinstimmend mit Hering [1] finde, dass, wenn bei der gewählten Kopfstellung die horizontale Visirebene sich in ihrer Primärlage und der Faden sich in der Medianebene befindet, der wirklich verticale Faden auch für vertical gehalten wird. Wenn man dagegen den Kopf nach hinten übergebeugt hat, so dass die Visirebene unterhalb ihrer Primärlage sich befindet, während der Faden in der Medianebene bleibt, so muss man das untere Ende des Fadens vom Beobachter entfernen. Ist umgekehrt der Kopf vornübergeneigt und die Visirebene über ihrer Primärlage, so muss man das untere Ende des Fadens dem Beobachter nähern, damit der Faden vertical erscheine.

Wenn der Faden sich nicht in der Medianebene befindet, sondern rechts von derselben, so erscheint er bei aufrechter Kopfhaltung, wenn die horizontale Visirebene in ihrer Primärlage befindlich ist, wieder vertical, wenn er wirklich vertical ist, und wieder muss sein unteres Ende genähert werden, wenn der Kopf vorn übergebeugt wird. Um die Ebene annähernd zu bestimmen, in der er geneigt werden muss, um vertical zu erscheinen, habe ich um den unteren Theil des Fadens einen zweiten gelegt, der eine lose Schlinge bildete, und mittels dieses zweiten den ersten so an mich herangezogen, dass jener vertical schien. Wenn ich dann nach dem horizontalen Faden herabblickte, wobei der verticale in stark divergirenden Doppelbildern erscheint, halbirte gewöhnlich der horizon-

[1] Beiträge zur Physiologie. Heft V. S. 297.

tale den Winkel dieser Doppelbilder, woraus folgt, dass der vertical erscheinende Faden, wenigstens nahehin, soweit die hier erreichbare Genauigkeit zu beurtheilen zulässt, in der den Convergenzwinkel halbirenden Verticalebene liegen musste.

Bei hinten übergeneigtem Kopfe dagegen musste ich das untere Ende des Fadens von mir wegziehen, wobei die Richtung des ziehenden Fadens aber, so weit erkennbar, dieselbe blieb, wie vorher.

Die Erklärung dieser Thatsachen scheint mir zusammenzuhängen mit dem im vorigen Paragraphen Seite 611 erwähnten Umstande, dass bei convergirenden Augen, die Richtung und Lage der gesehenen Objecte so beurtheilt wird, als wenn das Auge eine der mittleren Sehrichtung parallele Richtung und die entsprechende Raddrehung hätte. Die stattfindende Convergenz der Augen wird hierbei nicht berücksichtigt. Wenn wir diese auf den hier vorliegenden Fall übertragen, so würde folgen, dass diejenigen Linien vertical zur Visirebene erscheinen, welche sich abbilden auf solchen Meridianen des Auges, welche bei der Stellung des Auges parallel der mittleren Sehrichtung wirklich vertical sein würden zur Visirebene.

Wenn der Fixationspunkt in der Medianebene liegt, so wird die mittlere Sehrichtung der Medianebene parallel sein, und bei Augen, die dem Listing'schen Gesetze folgen, keine Drehung um ihre Längsaxe bedingen. Also werden die in der Primärstellung zur Visirebene verticalen Meridiane auch bei geneigter Visirebene zu dieser normal sein, so lange die Augen der mittleren Sehrichtung, also der Medianebene parallel gerichtet sind. Geht man aber zur Convergenzstellung über, so werden sie bei nach unten geneigter Visirebene sich so drehen, dass die vorher senkrechten Medianebenen derselben nach oben hin convergiren, umgekehrt bei nach oben geneigter Visirebene. Die Schnittlinie jener beiden Meridianebenen würde die scheinbar zur Visirebene senkrechte Linie sein, welche im ersteren Falle nach oben, im andern nach unten sich dem Beobachter nähert.

Bei den seitlich nach unten oder oben geneigten Blickrichtungen sind aber nicht mehr dieselben Meridiane der Augen zur Visirebene normal, wie in der Primärstellung. Dass auch der scheinbar verticale Faden sich in beiden Augen nicht auf den in der Primärstellung verticalen Meridianen abbildet, kann man leicht erkennen, wenn man gerade vor sich an der Wand einen verticalen Streifen befestigt, der deutliche Nachbilder liefert. Diese Nachbilder bilden dann zum Theil sehr grosse Winkel mit dem scheinbar verticalen Faden, sobald man diesen fixirt. Der scheinbar verticale Faden scheint also hier zu liegen in denjenigen Meridianen, welche bei der der mittleren Sehrichtung parallelen Blickrichtung vertical sein würden [1].

Zu bemerken ist aber, dass nach Volkmann's Versuchen, die ich selbst bestätigt finde, bei mangelnder Raddrehung und monocularem Sehen die scheinbar

---

[1] Herr E. Hering hat diese Erscheinungen mit der Horopterlehre in Verbindung gebracht, wovon im folgenden Paragraphen mehr. Ich bemerke, dass die vertical zur Visirebene erscheinenden Linien bei mir nie im Horopter liegen, sondern stets in gekreuzten Doppelbildern erscheinen. Da bei Herrn Hering's Augen die Abweichung der zum Netzhauthorizont wirklich und scheinbar verticalen Meridiane fehlt oder sehr gering ist, so wird seine Regel für sein Auge, wenigstens in den Medianstellungen, von denen er spricht, individuelle Richtigkeit haben.

zum Netzhauthorizont verticalen Meridiane auch absolut vertical erscheinen, während beim binocularen Sehen die verticale Linie entsprechen muss den beiden zur Visirebene absolut verticalen Meridianen. Beim binocularen Sehen hebt sich also der einander entgegengesetzte Einfluss, den die Neigung der scheinbar verticalen Meridiane beider Augen auf die Beurtheilung der Stellung einer Senkrechten haben könnte, gegenseitig auf. Dass dies für die Neigungen nach rechts und links hin geschieht, erklärt sich leicht; zu bemerken aber ist, dass für die Beurtheilung der Neigung der gesehenen Linie nach vorn oder nach hintenüber die Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane ohne Wirkung bleibt. Wir werden im nächsten Abschnitte sehen, dass diese Abweichung sich wahrscheinlich an der Anschauung horizontaler Linien erzeugt hat, und daraus erklärt sich dann, dass sie uns nicht über verticale Linien täuscht.

Ein ähnlicher Irrthum über die Tiefendistanz kommt nun übrigens nicht blos bei solchen Linien vor, die durch den Fixationspunkt gehen und in der Medianebene liegen, sondern auch bei anders gerichteten Linien, die durch den Fixationspunkt gehen und nur nahehin senkrecht zur mittleren Sehrichtung sind. Die scheinbare Lage solcher Linien entspricht dem vorher aufgestellten Gesetze. Wir deuten sie so, als wenn wir dieselben Netzhautbilder erhalten hätten bei einer Stellung der Augen, parallel der mittleren Sehrichtung.

In dieser Beziehung hat Recklinghausen gezeigt, dass, wenn man auf einer ebenen Fläche einen Stern zeichnet, aus einer Anzahl von Linien bestehend, die sich in einem Punkte schneiden, und man diesen Mittelpunkt fest mit nach oben gerichtetem Blick fixirt, die nach oben gerichteten Strahlen des Sterns in einer concaven Kegelfläche zu liegen scheinen, die nach unten gerichteten in einer convexen; umgekehrt, wenn man den Kreuzungspunkt der Strahlen mit nach unten gerichtetem Blicke fixirt. Ich finde die Täuschung noch auffallender, wenn man die nahehin horizontalen Strahlen weglässt und statt der auf Papier gezeichneten Linien feine glatte Drähte benutzt, die man in einem Korke so feststeckt, dass sie von einem Punkte aus divergiren und in einer Ebene liegen.

Der Theorie nach, welche aus dem oben angeführten Gesetze hergeleitet ist, müssen die besagten Linien scheinbar in einer Kegelfläche zweiten Grades liegen, deren Spitze im Fixationspunkte liegt, die ferner durch die beiden Blicklinien geht und deren Durchschnitt mit der durch die Mittelpunkte der Augen senkrecht zur Visirebene gelegten Ebene eine Ellipse ist, deren verticale Axe etwas grösser ist, als die horizontale.

Recklinghausen hat auch durch Versuche die Lage solcher Linien ermittelt, die zur mittleren Sehrichtung bei gehobenem oder gesenktem Blicke senkrecht erschienen. Er benutzte dazu einen feinen glatten Draht, der in der Mitte mittels eines feinen Charniergelenks so verstellt werden konnte, dass er verschiedene Neigung gegen die mittlere Sehrichtung (Halbirungslinie des Convergenzwinkels) erhielt. Das Gelenk, was ihn trug, war andererseits an einer runden Eisenstange befestigt, welche in der Verlängerung der mittleren Sehrichtung lag und um ihre Längsaxe gedreht werden konnte. Durch Drehung um diese Axe konnte der Ebene, in welcher der Draht sich bewegte, verschiedene Neigung gegen die Visirebene gegeben und bei jeder Stellung dieser Ebene die Stellung

des Drahtes gesucht werden, bei welcher sein oberes und unteres Ende gleich weit vom Beobachter entfernt schien.

Die Theorie fordert für die genannten Lagen des Drahtes wiederum eine durch den Fixationspunkt und die Blicklinien gehende Kegelfläche zweiten Grades. Die Messungen von RECKLINGHAUSEN stimmten sehr gut mit dieser Folgerung der Theorie. Er nannte diese Fläche die Normalfläche, weil in ihr die zur mittleren Sehrichtung scheinbar normalen Linien liegen.

Diese Normalfläche würde für solche Augen, welche keine Abweichung des scheinbar verticalen Meridians haben, mit der im nächsten Paragraphen zu untersuchenden Horopterfläche für Linien, die durch den Fixationspunkt gehen, zusammenfallen. Dagegen ist sie mit dieser nicht identisch bei Augen, deren scheinbar verticale Meridiane nicht mit den wirklich verticalen zusammenfallen [1], wie sich im nächsten Abschnitte zeigen wird.

Wenn man ein System concentrischer Kreise auf ein Blatt zeichnet und bei convergirenden Gesichtslinien und geneigter Blickebene deren Mittelpunkt fixirt, so erhalten diese Kreise ebenfalls eine kleine scheinbare Drehung um ihre horizontale Axe in demselben Sinne, wie die verticalen Linien, aber von geringerer Grösse. Hat man nun einen verticalen Diameter der Kreise hinzugefügt, so wird dieser stärker geneigt, als die Kreise, und löst sich scheinbar von ihnen los. Bei gehobener Blickebene erscheint das obere Ende des Durchmessers dem Beobachter näher als die Ebene der Kreise, das untere entfernter. Umgekehrt bei gesenkter Blickebene.

Da die horizontal verlaufenden Bögen der Kreise keine sichere binoculare Anschauung geben, erscheinen sie auch zuweilen winkelig verbogen und dem Durchmesser anzuhaften.

Auch dieser Versuch gelingt sehr viel leichter, wenn man Kreise und Durchmesser aus sehr feinen Drähten zusammenfügt. Die hierbei vorkommende Täuschung erfordert, dass der Beobachter am Bilde die stattgefundene Drehung der Augen nicht erkennen könne. Auf einem Papierblatte sind in der Regel Merkpunkte genug, an denen der Beobachter erkennt, dass er zwei gegen einander gedrehte Bilder desselben Objects vor sich hat. Die Objecte für die hier beschriebenen Versuche müssen so beschaffen sein, dass sie auch unter Voraussetzung kleiner Drehungen ihres Netzhautbildes noch eine reelle Deutung zulassen. Wir fanden oben ein ähnliches Verhältniss für die Erkennung der Convergenz aus gewissen Eigenthümlichkeiten der Bilder.

Regeln der stereoskopischen Projection.

Es sei in *Fig. 194* (S. 665) die Ebene des Papiers die Visirebene, in der P und Q die Mittelpunkte der Visirlinien für beide Augen darstellen. Es sei AB der Durchschnitt einer stereoskopischen Zeichnung, deren Ebene normal sowohl zur Visirebene als zur Medianebene des Kopfes sei, der gewöhnlichen Haltung entsprechend, in der man stereoskopische Zeichnungen zu betrachten pflegt. CD sei die Medianlinie der Visirebene, S ein darzustellender Punkt, der auch ausserhalb der

[1] RECKLINGHAUSEN selbst hat diesen Unterschied nicht gemacht; denn obgleich er die Abweichung des scheinbar verticalen Meridians entdeckt hat, hat er den Einfluss dieser Abweichung auf die Lage der identischen Stellen noch nicht gekannt.

Visirebene liegen kann; in diesem Falle stellt das S in der Zeichnung den Fusspunkt des von ihm auf die Visirebene gefällten Perpendikels dar. Um die Projection des Punktes S in den beiden Zeichnungen zu finden, ziehe man die Linien SP und SQ, welche die Ebene der Zeichnung in R und T schneiden. Die letzteren beiden Punkte sind diejenigen, in welchen S beziehlich für das Auge P oder Q darzustellen ist. Um die Lage dieser Punkte zu bezeichnen, wollen wir rechtwinkelige Coordinaten benutzen, welche beziehlich der Visirebene, der Medianebene und der Ebene der zu machenden Zeichnung parallel seien, deren Mittelpunkt O, der Durchschnittspunkt der drei genannten Ebenen ist. Und zwar sei OA die Richtung der positiven x, OD die der positiven z, die y senkrecht zur Ebene des Papiers. Bezeichnen wir demgemäss die Coordinaten

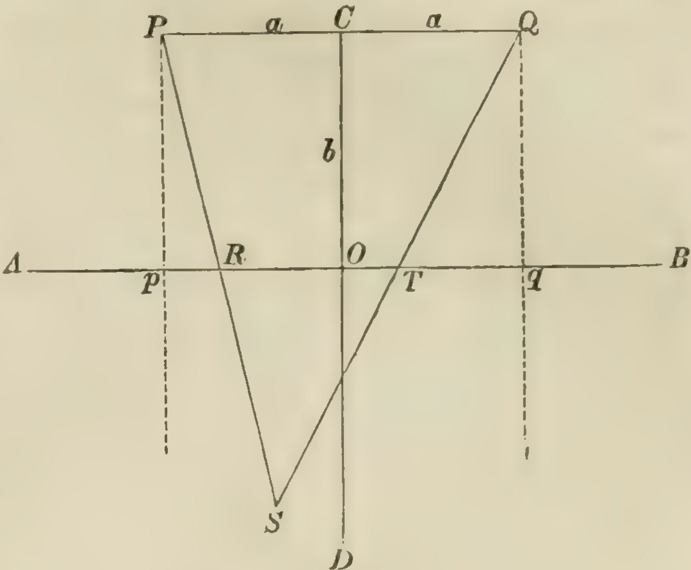


Fig. 194.

1) des Punktes P mit $x = +a$, $z = -b$, $y = 0$

2) des Punktes Q: $x = -a$, $z = -b$, $y = 0$

3) des Punktes S mit $x = \alpha$, $y = \beta$, $z = \gamma$

4) des Punktes R mit $x = \xi_0$, $y = v_0$, $z = 0$

5) des Punktes T: $x = \xi_1$, $y = v_1$, $z = 0$,

so sind die Bedingungen dafür, dass die Punkte P, R, S in einer geraden Linie liegen,

$$\frac{\alpha - a}{\alpha - \xi_0} = \frac{\beta}{\beta - v_0} = \frac{\gamma + b}{\gamma} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

und die Bedingungen, dass Q, T, S in einer geraden Linie liegen,

$$\frac{\alpha + a}{\alpha - \xi'} = \frac{\beta}{\beta - v'} = \frac{\gamma + b}{\gamma} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2).$$

Zunächst zeigt sich, dass

$$v = v' = \frac{\beta b}{\gamma + b} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\text{ a}),$$

dass also in beiden Bildern die Höhen entsprechender Punkte über der Horizontallinie AB gleich gross sein müssen.

Die beiden Gleichungen ergeben ferner

$$\xi_0 = \alpha - \frac{\gamma(\alpha - a)}{\gamma + b} = \frac{\alpha b + \gamma a}{b + \gamma}$$

$$\xi_1 = \alpha - \frac{\gamma(\alpha + a)}{\gamma + b} = \frac{\alpha b - \gamma a}{b + \gamma}.$$

Die Differenz ε dieser beiden Werthe

$$\varepsilon = \xi_0 - \xi_1 = \frac{2\gamma a}{b+\gamma} \quad \dots\dots\dots \quad 1\text{ b)}$$

ist unabhängig von den Werthen von α und β; sie ist also für alle Objectpunkte dieselbe, welche als in gleicher Entfernung hinter der Ebene der Zeichnung liegend angenommen werden. Diese Differenz $(\xi_0 - \xi_1)$ bezeichnet die Grösse der Verschiebung, welche die Punkte der einen Zeichnung im Vergleich zu denen der andern nach rechts oder nach links hin erlitten haben. Dabei ist angenommen, dass die Zeichnungen so aufeinander gelegt sind, dass Punkte, die in dieser Ebene der Zeichnung selbst gedacht werden (z. B. die Linie, welche die Zeichnung einrahmt), aufeinander fallen. In vielen Fällen ist es dagegen passender, die Zeichnungen so zu vergleichen, dass unendlich weit entfernte Punkte aufeinander fallen, zum Beispiel die Punkte p, q, welche durch die beiden parallel mit CD gerichteten Blicklinien Pp und Qq getroffen werden. Setzen wir $\gamma = \infty$, so wird nach Gleichung 1 b)

$$\varepsilon_\infty = 2a$$

und setzen wir

$$e = \varepsilon_\infty - \varepsilon$$

und

$$b + \gamma = \varrho,$$

so ist

$$e = \frac{2ab}{\varrho} \quad \dots\dots\dots\dots \quad 1\text{ c)}.$$

In dieser Gleichung bezeichnet $2a$ die Distanz beider Augen, b den Abstand der Zeichnung, ϱ den Abstand des Objects von einer Ebene, die durch die Mittelpunkte beider Augen senkrecht zur Visirebene gelegt ist. Für alle reellen, vor den Augen liegenden Punkte muss e immer positiv sein, weil $2a$, b und ϱ immer positiv sind. Dabei liegt in dem Bilde für das rechte Auge jeder nähere Punkt mehr nach links als in dem des linken Auges. Zugleich lässt die Gleichung 1 c) erkennen, dass die stereoskopische Differenz e für sehr grosse Abstände ϱ sehr klein ist und erst für kleine Werthe von ϱ gross wird.

Den Umstand, dass die Grösse von e gleich gross ist für Gegenstände, die alle in derselben, der Ebene der Zeichnung parallelen Ebene liegen, hat O. N. Rood [1] benutzt, um ein Instrument zu construiren, mit dem man von gegebenen einzelnen perspectivischen Zeichnungen beliebiger Objecte ein Paar zusammengehörige stereoskopische Zeichnungen copiren kann. Das Original, mit Oel transparent gemacht, wird auf einer horizontalen Glasplatte befestigt und von unten her beleuchtet. Darauf wird ein ebener viereckiger Rahmen gelegt, dessen untere Seite mit Schreibpapier überzogen ist. Dieser Rahmen kann mittels einer Stellschraube um kleine Distanzen von rechts nach links verschoben werden. Man zeichnet nun zunächst eine Zeichnung vollständig nach, ohne die Stellung des Rahmens zu verändern, und die andere so, dass man mit den ganz vorn befindlichen Linien beginnt und dann zu den nächst entfernteren übergeht und so fort. Bei jedem Uebergange aber zu entfernteren Punkten verschiebt man den Rahmen, der die Copie trägt, ein wenig, entsprechend dem Tiefenabstande. So erhält man zwei Zeichnungen, welche stereoskopisch combinirt ein körperliches Relief zeigen.

Wenn zwei Punkte von verschiedenem Abstande $\varrho_{\prime}$ und $\varrho_{\prime\prime}$ stereoskopisch

---

[1] *American Journal of Science and Arts.* Vol. XXXI, p. 71. Jan. 1861.

projicirt sind und die entsprechenden stereoskopischen Differenzen mit $e_{,}$ und $e_{,,}$ bezeichnet werden, so ist

$$e_{,} - e_{,,} = 2ab\left(\frac{1}{\varrho_{,}} - \frac{1}{\varrho_{,,}}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2a).$$

Nehmen wir hierin für $e_{,} - e_{,,}$ den kleinsten in der Zeichnung erkennbaren Abstand, so erhalten wir zusammengehörige Werthe der Abstände $\varrho_{,}$ und $\varrho_{,,}$, welche an der Grenze der erkennbaren Unterschiede liegen. Setzen wir zur Abkürzung

$$\frac{2ab}{e_{,} - e_{,,}} = f,$$

so wird die Gleichung 2 a)

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\varrho_{,}} - \frac{1}{\varrho_{,,}}$$

die oben für diesen Fall gegebene Formel. Wenn wir die mittlere geometrische Proportionale zwischen $\varrho_{,}$ und $\varrho_{,,}$ mit $\mathfrak{r}$ bezeichnen, so lässt sich die letzte Formel auch schreiben

$$\varrho_{,,} - \varrho_{,} = \frac{\mathfrak{r}^2}{f},$$

d. h. die stereoskopisch unterscheidbaren Unterschiede der Entfernung wachsen wie die des Quadrats der mittleren Entfernung $\mathfrak{r}$.

Um die Veränderungen zu übersehen, welche das stereoskopische Relief bei verschiedenen Verschiebungen der Bilder liefert, müssen wir die scheinbaren Coordinaten des Objectpunktes α, β, γ ausdrücken durch die Coordinaten seiner beiden Bilder $\xi_{,}, \xi_{,,}, v$. Aus den obigen Gleichungen 1) und 2) ergiebt sich

$$\frac{\alpha - a}{\alpha - \xi_0} = \frac{\alpha + a}{\alpha - \xi_1}$$

oder

$$\alpha = \frac{a(\xi_1 + \xi_0)}{2a + \xi_1 - \xi_0}$$

$$\beta = \frac{2va}{2a + \xi_1 - \xi_0}$$

$$\gamma = \frac{b(\xi_0 - \xi_1)}{2a + \xi_1 - \xi_0}$$

oder wenn wir wie vorher die stereoskopische Differenz

$$2a + \xi_1 - \xi_0 = e$$

setzen und das arithmetische Mittel von ξ_0 und ξ_1 mit $\mathfrak{x}$ bezeichnen, so ist

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \mathfrak{x}\,\frac{2a}{e} \\ \beta &= v\,\frac{2a}{e} \\ \varrho = \gamma + b &= b\,\frac{2a}{e} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3a).$$

Wenn wir ein Paar zusammengehöriger stereoskopischer Zeichnungen beide nach einer Seite bewegen, also $\mathfrak{x}$ vergrössern, während e, v, b unverändert bleiben, so vergrössern sich die Werthe von α, während β und ϱ unverändert bleiben. Die Vergrösserung von α ist aber im Verhältniss $\frac{2a}{e}$ grösser als die von $\mathfrak{x}$. Eliminiren wir die stereoskopische Differenz e aus der ersten und dritten Gleichung, so wird

$$\alpha = \varrho \cdot \frac{\mathfrak{x}}{b}.$$

Die Vergrösserungen von α sind also auch proportional der scheinbaren Entfernung ϱ des Objectpunktes; d. h. also die Punkte, welche vor der Verschiebung scheinbar gerade hinter einander lagen, d. h. gleiche Werthe von $\mathfrak{x}$ hatten, liegen nach der Verschiebung in einer geraden Linie, die durch den mitten zwischen den Mittelpunkten beider Augen liegenden Punkt zu ziehen ist.

Wenn wir ein Paar zusammengehöriger stereoskopischer Zeichnungen, die auf einem Blatte ausgeführt sind, von dem Auge entfernen, also b vergrössern, während $\mathfrak{x}$, v, e und a unverändert bleiben, so bleiben die Werthe von α und β unverändert, die Tiefendimension ϱ aber wächst in demselben Verhältnisse wie b. Man beobachtet dies in der That leicht, wenn man ein solches Paar stereoskopischer Bilder mit parallelen Gesichtslinien zur Coincidenz bringt; ihr Relief wird desto tiefer, je weiter man die Bilder vom Auge entfernt.

Um endlich die Veränderungen übersehen zu können, welche eintreten, wenn man die stereoskopischen Zeichnungen einander nähert oder von einander entfernt, schreiben wir die Gleichungen 3 a) in folgender Form

$$\left.\begin{aligned} \frac{\alpha}{\varrho} &= \frac{\mathfrak{x}}{b} \\ \frac{\beta}{\varrho} &= \frac{v}{b} \\ \frac{1}{\varrho} &= \frac{e}{2ab} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3\text{b})$$

und bemerken dabei, dass $2\mathfrak{x} = \xi_0 + \xi_1$ und $e = 2a + \xi_1 - \xi_0$ ist. Wenn man nun das rechte Bild nach links, das linke nach rechts schiebt um die Länge η, so verkleinert man ξ_0 und vergrössert ξ' um die Länge η, folglich bleibt $\mathfrak{x}$ (so wie auch v) ungeändert, während der Werth von e um 2η wächst. Nennen wir nun α_1, β_1 und ϱ_1 die Werthe von α, β, ϱ welche nach dieser Verschiebung gelten, so verwandeln sich die Gleichungen 3 b) in folgende

$$\frac{\alpha_1}{\varrho_1} = \frac{\mathfrak{x}}{b}, \quad \frac{\beta_1}{\varrho_1} = \frac{v}{b}$$
$$\frac{1}{\varrho_1} = \frac{e + 2\eta}{2ab}.$$

Drückt man in diesen nun $\mathfrak{x}$, v und e durch ihre Werthe in 3 b) aus, so erhält man

$$\left.\begin{aligned} \frac{\alpha_1}{\varrho_1} = \frac{\alpha}{\varrho}, \quad \frac{\beta_1}{\varrho_1} = \frac{\beta}{\varrho} \\ \frac{1}{\varrho_1} = \frac{1}{\varrho} + \frac{\eta}{ab} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4).$$

Hierin sind α, β, ϱ die ursprünglichen Coordinaten des betreffenden Objectpunktes, bezogen auf ein Coordinatensystem, dessen Mittelpunkt in der Mitte zwischen den Mittelpunkten beider Augen liegt und den wir den Gesichtspunkt nennen wollen, α_1, β_1 und ϱ_1 sind die entsprechenden Coordinaten für die scheinbare Lage des Punktes, welche er nach der gegenseitigen Näherung der richtigen stereoskopischen Projectionen hat. Durch die Gleichungen 4) ist für jeden Punkt die Lage seines Bildes nach solcher Verschiebung eindeutig gegeben. Die ersten beiden Gleichungen sagen aus, dass der scheinbare und wahre Ort des Punktes beide in der gleichen vom Mittelpunkt der Coordinaten aus gezogenen geraden Linie liegen. Die dritte Gleichung zeigt an, dass seine Entfernung von der durch beide Augen gelegten Verticalebene verändert, und zwar bei positiven Werthen von η verringert ist. Setzen wir die Grösse $\frac{ab}{\eta} = p$, so wird die letzte Gleichung

$$\frac{1}{\varrho_1} = \frac{1}{\varrho} + \frac{1}{p} \quad \text{. . . . . 4a)}$$

dieselbe, welche die Entfernungen des Objects ϱ und seines Bildes ϱ_1 für eine Concavlinse von der Brennweite p geben würde.

Für unendlich weit entfernte Punkte wird $\varrho = \infty$ und $\varrho_1 = p$.

Es bezeichnet also p die Entfernung der Ebene, auf der sich alle unendlich weit entfernten Punkte des Originals abbilden, welche wir mit Breysig die Hauptebene nennen können.

Wenn der Objectpunkt α, β, ϱ irgend einen Punkt einer bestimmten Ebene bezeichnet, also für ihn eine Gleichung von der Form existirt

$$A\alpha + B\beta + C\varrho + D = 0 \quad \text{. . . . . . . 5),}$$

so ergiebt sich aus den Gleichungen 4) und 4a)

$$A\alpha_1 + B\beta_1 + \left[C - \frac{D}{p}\right]\varrho_1 + D = 0 \quad \text{. . . . . 5a).}$$

Die Bildpunkte liegen also auch in einer Ebene; und wenn $A = B = 0$, das heisst die Ebene des Originals der durch beide Augen gehenden Verticalebene $\varrho = 0$ parallel ist, so ist die Bildebene derselben Ebene also auch ihrem Original parallel. Wenn andererseits $D = 0$ ist, das heisst die Originalebene durch den Mittelpunkt der Coordinaten, oder den Gesichtspunkt geht, so fällt die Bildebene ganz mit ihrem Original zusammen.

Wenn wir im Original eine Schaar paralleler Ebenen haben, deren Gleichung in der Form 5) gegeben ist und die einzeln dadurch unterschieden sind, dass D für jede einen andern Werth hat, so reducirt sich die Gleichung 5a) für die Bildebenen, wenn man darin $\varrho_1 = p$ setzt, auf

$$A\alpha_1 + B\beta_1 + Cp = 0 \quad \text{. . . . . 4c).}$$

welche unabhängig von D ist. Das heisst die Abbilder aller jener parallelen Ebenen schneiden die Ebene $\varrho_1 = p$ (die Hauptebene) in derselben geraden Linie, deren Gleichung in 4c) gegeben ist.

Die Abbilder einer Schaar paralleler Ebenen schneiden sich also entweder einander und die Hauptebene gar nicht, oder sie schneiden sich und die Hauptebene alle in einer geraden Linie, ihrer Fluchtlinie. Da nach der vorher gemachten Bemerkung diejenige in jener Schaar paralleler Ebenen, welche durch den Mittelpunkt des Coordinatensystems geht, mit ihrem Bilde zusammenfallen muss, so muss diese

Ebene auch die Hauptebene in der Fluchtlinie schneiden. Um die Fluchtlinie einer Schaar paralleler Ebenen zu finden, lege man ihnen parallel also eine Ebene durch den Gesichtspunkt; diese schneidet die Hauptebene in der gesuchten Fluchtlinie.

Wenn wir ferner die Gleichungen 4) in die Form setzen

$$\alpha_1 - \alpha + \frac{\alpha \varrho_1}{p} = 0, \qquad \beta_1 - \beta + \frac{\beta \varrho_1}{p} = 0,$$

$$\varrho_1 = \frac{\varrho a b}{ab + \varrho \eta},$$

so ergiebt sich, dass für $\varrho = 0$, sein muss

$$\varrho_1 = \varrho = 0, \qquad \alpha_1 = \alpha, \qquad \beta_1 = \beta,$$

dass also für jeden Punkt der Ebene $\varrho = 0$ das Abbild mit dem Original zusammenfällt.

Nennen wir diese Ebene $\varrho = 0$ die Congruenzebene (BREYSIG's Bildebene), so ist das Bild jeder Ebene A des Originals zu construiren, indem man eine Ebene legt durch die Schnittlinien von A mit der Congruenzebene und die zu A gehörige Fluchtlinie.

Gerade Linien des Originals sind zu betrachten als Schnittlinien je zweier Ebenen. Ihr Bild muss die Schnittlinie der Abbilder beider Ebenen, also wieder eine gerade Linie sein. Eine Schaar paralleler gerader Linien kann angesehen werden als das System der Schnittlinien von zwei Schaaren paralleler Ebenen. Die Abbilder dieser Ebenen müssen sich beziehlich mit der Hauptebene in den beiden zugehörigen Fluchtlinien schneiden, und ihre Schnittlinien, das heisst die Abbilder aller jener parallelen geraden Linien des Originals werden durch den Schnittpunkt beider Fluchtlinien gehen müssen, wenn die beiden Fluchtlinien sich überhaupt schneiden, was sie nicht thun würden, wenn die Schaar der gegebenen geraden Linien der Hauptebene und Antlitzebene parallel wäre.

Die Abbilder paralleler gerader Linien, wenn sie der Hauptebene nicht parallel sind, schneiden diese also in einem Punkte, dem Fluchtpunkte.

Dieser Fluchtpunkt für eine gerade Linie des Originals, die der Hauptebene nicht parallel ist, wird gefunden, wenn man durch den Gesichtspunkt mit der betreffenden Geraden eine Parallele legt; wo diese die Hauptebene schneidet, ist der Fluchtpunkt.

Das Abbild einer geraden Linie des Originals findet man, indem man ihren Schnittpunkt mit der Congruenzebene durch eine Gerade mit dem zugehörigen Fluchtpunkte verbindet.

Man sieht, dies sind genau dieselben Constructionsregeln, welche für Reliefbilder vorgeschrieben worden sind, mit der einzigen Ausnahme, dass bei Reliefbildern die Ebene, deren Punkte mit ihren Bildern zusammenfallen (BREYSIG's Bildebene), nicht nothwendig durch die Augen selbst geht. Diese Bedingung ist nämlich nur dann nothwendig zu erfüllen, wenn die Grösse des durch das Reliefbild dargestellten Gegenstandes unverändert erscheinen soll.

Denkt man sich nämlich sämmtliche Coordinaten der Punkte des Originals proportional verkleinert oder vergrössert, setzt man also in die Gleichungen 4) statt

$$\alpha, \qquad \beta, \qquad \varrho,$$

beziehlich

$$n\alpha, \qquad n\beta, \qquad n\varrho,$$

so verwandeln sich die Gleichungen 4) in

$$\left.\begin{array}{l}\frac{\alpha_1}{\varrho_1} = \frac{\alpha}{\varrho}, \quad \frac{\beta_1}{\varrho_1} = \frac{\beta}{\varrho} \\ \frac{1}{\varrho'} = \frac{1}{n\varrho} + \frac{1}{p}\end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots 6).$$

Wenn ϱ unendlich ist, wird $\varrho_1 = p$, also die Ebene $\varrho' = p$ ist die Hauptebene, in der die unendlich entfernten Punkte abgebildet werden.

Wenn im Original die Ebene

$$A\alpha + B\beta + C\varrho + D = 0 \quad \ldots\ldots\ldots 5)$$

besteht, so erhält man mittels der Gleichungen 6) für das Bild

$$A\alpha_1 + B\beta_1 + \left[C - D\frac{n}{p}\right]\varrho_1 + Dn = 0 \quad \ldots\ldots 5b).$$

Wenn $D = 0$, so ist die zweite Gleichung identisch mit der ersten und die Originalebene fällt mit ihrem Bilde zusammen. Dieser Bedingung genügen die Ebenen, welche durch den Punkt $\alpha = \beta = \varrho = 0$ gehen, der also die Bedeutung des Gesichtspunktes hat. Endlich schneiden sich die Ebenen 5) und 5b), wo

$$\left.\begin{array}{l}D = Dn - Dn\frac{\varrho_1}{p} \\ \text{oder} \\ \varrho_1 = p \cdot \frac{n-1}{n}\end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots 5c).$$

Die durch die Gleichung 5c) gegebene Ebene, die den Gesichtspunkt nicht enthält, ist also die Congruenzebene. Sobald also das Relief nach den gewöhnlich angenommenen Regeln construirt ist und der Gesichtspunkt nicht in der Congruenzebene liegt, so ist es, aus dem richtigen Gesichtspunkte betrachtet, optisch ähnlich der Darstellung eines verkleinerten oder vergrösserten Modells des Originals, in welchem der Gesichtspunkt des Beobachters seine relative Lage behalten hat. Dabei ist dann der Gesichtswinkel, unter dem das Reliefbild erscheint, noch derselbe wie für das Original. Wenn die Congruenzebene zwischen Beobachter und Relief liegt, entspricht letzteres einem linear vergrösserten Objecte, wenn die Bildebene dagegen hinter dem Beobachter liegt, einem linear verkleinerten Objecte.

Wenn die Congruenzebene sich der Hauptebene unendlich nähert ($n = \infty$), so verwandelt sich das Reliefbild in eine ebene perspectivische Zeichnung.

Die Veränderungen, welche scheinbar vor sich gehen, wenn man zwei richtige stereoskopische Abbildungen eines Objects in ihrer eigenen Ebene einander nähert oder entfernt, sind also von derselben Art, wie sie bei der Ausführung von Reliefbildern des Originals stattfinden. Man beobachtet die Erscheinung auch leicht an stereoskopischen Bildern, wenn man die angegebenen Bewegungen ausführt, und kann durch dieses Mittel leicht die gewünschte richtige Tiefenanschauung des Objects hervorbringen. Doch ist zu bemerken, dass wir auch ohne den Bildern die richtige Entfernung zu geben, bei bekannten Objecten meistens die richtige Tiefenanschauung bilden, weil wir nicht sehr empfindlich für den absoluten Werth der Convergenz unserer Gesichtslinien sind, und eben deshalb leicht, wenn andere Vergleichungspunkte fehlen, so urtheilen, als hätten unsere Blicklinien den Grad der Convergenz, der einer richtigen Tiefenanschauung des Objects entsprechen würde.

Es ist hierbei freilich zu bemerken, dass bei einer solchen Verschiebung stereoskopischer Bilder nicht blos der Grad der Convergenz der Gesichtslinien geändert wird, sondern auch die Ansicht der Bilder selbst, weil bei unveränderter Fixation derselben Punkte die Gesichtslinien, wenn sie vor der Verschiebung senkrecht auf der Fläche des Bildes waren, es nach der Verschiebung nicht mehr sind und daher auch das Bild sich etwas anders auf die Netzhaut projicirt. Es lässt sich aber leicht einsehen, dass, wenn wir die Bilder selbst so drehen wollen, dass ihr Netzhautbild unverändert bleibt, die nach entsprechenden Punkten der Bilder gezogenen geraden Linien sich grösstentheils nicht mehr schneiden würden, und also kein reeller Punkt gleichzeitig den beiden Punkten in den Zeichnungen entsprechen würde. Wie die Projection des Bildes in solchen Fällen geschieht, kann erst im folgenden Abschnitte bei der Lehre vom Horopter ermittelt werden.

Wenn man stereoskopische Bilder durch convexe oder concave Linsen ansieht, welche dicht vor die beiden Augen des Beobachters gestellt sind, und deren Mittelpunkte gleich weit von einander entfernt sind wie die Mittelpunkte beider Augen, so wachsen dadurch die Grössen e, $\mathfrak{x}$ und v der Gleichungen 3a) in demselben Maasse, wie die scheinbare Entfernung des Bildes b; es bleiben demnach die Werthe der Grössen α, β und ϱ ungeändert. Solche Linsen verändern also nicht die scheinbare Lage und Grösse des stereoskopischen Reliefs. Es ist dies wichtig wegen der Brillengläser, welche, wenn sie richtig gestellt sind, keine Grössenveränderung im Gesammtbilde hervorbringen, trotzdem jedes einzelne optische Bild in der That vergrössert oder verkleinert ist.

Damit aber Brillengläser richtige Grössen und Entfernungen der Objecte zeigen, ist es wesentlich nöthig, dass ihre optischen Mittelpunkte gerade so weit von einander entfernt sind, wie die Knotenpunkte der parallel gestellten Augen. Wenn in *Fig. 195* a_0 der optische Mittelpunkt eines concaven Brillenglases ist, b das Object, $a_0 f_0$ die optische Axe des Glases, so liegt das Bild β_0 von b in der Verbindungslinie von a_0 mit b; und wenn man von b und β_0 die Lothe $b f_0$ und $\beta_0 \varphi_0$ auf die optische Axe fällt, die Brennweite des Glases mit p bezeichnet und alsdann setzt

$$a_0 f_0 = r \qquad a_0 \varphi_0 = s,$$

so ist nach den Theoremen des §. 9, S. 63:

$$\frac{1}{r} - \frac{1}{s} = -\frac{1}{p}.$$

Fig. 195.

Dadurch ist die Lage von β_0 gegeben. Wenn nun die Linse parallel ihrer Hauptebene verschoben wird, so dass ihr optischer Mittelpunkt in a_1 und ihre optische Axe in $a_1 f_1$ liegt, so wird das Bild von b in die Verbindungslinie von b mit a_1 rücken, übrigens in dem Lothe $\varphi_0 \beta_0$ bleiben. Das Bild verschiebt sich also um die Länge

$$\beta_0 \beta_1 = a_0 a_1 \times \frac{\varphi_0 f_0}{a_0 f_0} = \alpha \cdot \frac{r - s}{r},$$

wenn wir die Verschiebung des Glases $a_0 a_1 = \alpha$ setzen. Daraus folgt mit Hülfe der obigen Gleichung zwischen r und s

$$\beta_0 \beta_1 = \alpha \frac{s}{p} = \alpha \frac{r}{r + p}.$$

Denken wir uns dicht hinter den Concavlinsen bei o ein Auge stehend, welches nach den Bildern β_0 und β_1 hinblickt und diese Bilder auf die feste Ebene cc projicirt in γ_0 und γ_1, so ist die scheinbare Verschiebung der Projection auf dieser Ebene, deren Abstand von a_0 wir mit A bezeichnen wollen,

$$\gamma_0 \gamma_1 = \beta_0 \beta_1 \cdot \frac{A}{s} = \frac{\alpha A}{p},$$

also unabhängig von der Lage des Objects b. Die Verschiebung des optischen Bildes bei Verschiebung der Concavlinse von a_0 nach a_1 ist also gerade dieselbe, als wenn man eine perspectivische Zeichnung des Objects auf der Ebene cc um die Grösse $\gamma_0 \gamma_1$ verschöbe. Denken wir uns die Projectionsebene cc im Brennpunkte der Linse, machen wir also $A = p$, so wird $\gamma_0 \gamma_1 = \alpha$, also gleich der wirklichen Verschiebung des Glases.

Die Erscheinungen, welche entstehen, wenn Brillengläser vor den Augen seitwärts verschoben werden, sind also dieselben, welche bei gegenseitiger Entfernung oder Näherung stereoskopischer Zeichnungen sich zeigen. Der Versuch bestätigt vollkommen diese Folgerung der Theorie. Stehen die Centren der Concavbrillengläser einander näher als die Augenmittelpunkte, so erscheinen die Gegenstände zu nah, im andern Falle zu weit. Bei Convexbrillen ist es umgekehrt, weil p das entgegengesetzte Vorzeichen hat.

Es ist dieser Umstand bei der Verfertigung der Brillen [1] wohl zu beachten, namentlich auch deshalb, weil eine fortgesetzte angestrengte Haltung des Auges leicht Schmerzen im Auge und im Kopfe hervorbringt. Concavbrillen, deren optische Mittelpunkte nicht weit genug von einander entfernt sind, zwingen die Augen fortdauernd zu convergiren; sind die Mittelpunkte im Gegentheile zu weit entfernt, so muss der Beobachter divergiren. Am schlimmsten ist es, wenn ein Mittelpunkt höher als der andere liegt. Namentlich die Nasenklemmer sind in dieser Beziehung oft falsch construirt. Wenn die optischen Mittelpunkte der Gläser in der Mitte ihrer Fläche sitzen, so sind sie einander zu nah und zwingen zum dauernden Convergiren. Auch Höhenabweichungen treten leicht ein, weil der Klemmer sich in der Regel nicht ganz horizontal auf dem Nasenrücken festsetzt.

Blickt man nach wirklichen Objecten durch zwei parallel gestellte Teleskope, zum Beispiel Binocles, so erhält man denselben Erfolg, als wenn man die entsprechenden stereoskopischen Zeichnungen dem Auge nähert; die Gesichtswinkel werden für alle Theile des Bildes gleichmässig vergrössert. Das entspricht nun, wie wir oben für diesen Fall bei den Zeichnungen gesehen haben, einer Annäherung und Verkürzung der Tiefendimensionen des Objects ohne Veränderung seiner zur Gesichtslinie senkrechten Dimensionen. Durch Binocles erscheinen also die Objecte genähert, übrigens in natürlicher Grösse, aber verflacht, als Basrelief. Das ist auch an menschlichen Gesichtern deutlich zu erkennen; sie nehmen immer einen unnatürlichen, halb bildartigen Ausdruck an.

Die Theorie des Telestereoskops ergiebt sich leicht, wenn man bedenkt, dass ein Beobachter die Objecte in einem Planspiegel so sieht, nur symmetrisch von rechts nach links umgekehrt, wie das Spiegelbild des Beobachters die wirklichen Gegenstände durch das Glas des Spiegels hindurch sehen würde.

Es sei *AA Fig. 196* (S. 674) der erste, *BB* der zweite Spiegel, *C* das Auge des Beobachters. Das Auge *C* sieht im ersten Spiegel *BB* die Dinge so, wie das

---

[1] Die stereoskopischen Erscheinungen, zu denen Brillengläser Veranlassung geben, sind genauer untersucht von F. C. DONDERS in *Anomalies of accommodation and refraction.* London 1864. p. 152 - 169.

Spiegelbild D dieses Auges sie durch BB hindurch sehen würde. Dabei muss die Entfernung $Cb = Db$ sein. Das Spiegelbild D sieht wieder die Dinge im Spiegel AA so, wie sie E, das von AA entworfene Spiegelbild, von D durch AA hindurch sehen würde, und der Ort von E ist dadurch bestimmt, dass Ea längs des reflectirten Strahls gemessen gleich Da längs des einfallenden gemessen sein muss. Daraus folgt, wie schon oben erwähnt ist, dass das Auge C durch die zwei Spiegel die Landschaft so sieht, wie sie von E aus direct gesehen erscheinen würde. Nun ist die stereoskopische Differenz e zweier Bilder, projicirt auf eine Zeichnung in der Entfernung b, wie Gleichung 1 c) lehrt,

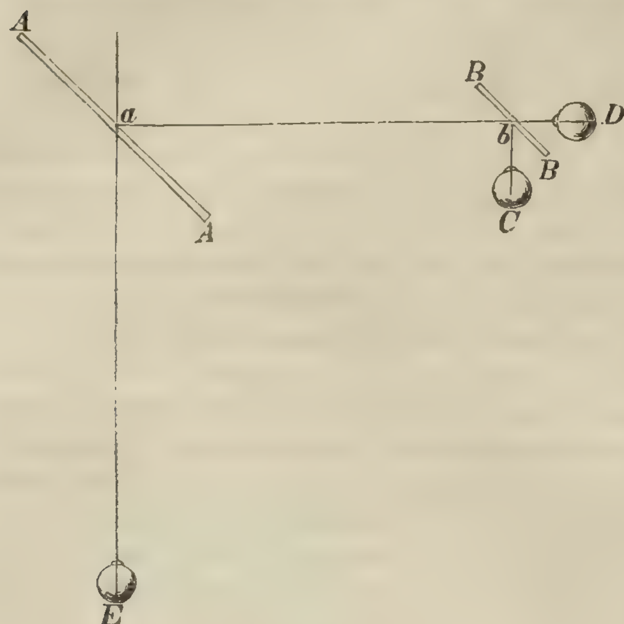


Fig. 196.

$$e = \frac{2Ab}{r},$$

wo $2A$ die Entfernung der beiden Gesichtspunkte bezeichnet, und r die Entfernung des Objects von der gemeinsamen verticalen Ebene beider Augen. Jene Entfernung $2A$ ist im Telestereoskop die Entfernung der beiden von je zwei Spiegeln entworfenen Spiegelbilder der Augen des Beobachters ($r_1\,\varrho_1$ der *Fig. 191*, Seite 648). Setzen wir nun diesen Werth von e in die Gleichungen 3 a), so wird, wenn unendlich entfernte Punkte mit parallelen Gesichtsaxen gesehen werden:

$$\alpha = \mathfrak{x}\,\frac{a}{A}\,\frac{\mathfrak{r}}{b} = \mathfrak{x}\,\frac{\varrho}{b}$$

$$\beta = v\,\frac{a}{A}\,\frac{\mathfrak{r}}{b} = v\,\frac{\varrho}{b}$$

$$\varrho = b\,\frac{a}{A}\,\frac{\mathfrak{r}}{b}.$$

Danach verhalten sich also α, β, ϱ zu einander beziehlich wie $\mathfrak{x}$, v, b, welche letzteren wir als die wirklichen Entfernungen ansehen können, aber die scheinbare Entfernung ϱ ist kleiner als r im Verhältniss $\frac{a}{A}$, und in demselben Verhältnisse sind also auch die übrigen scheinbaren Dimensionen reducirt. Die Landschaft erscheint also dann, wie ein richtig construirtes verkleinertes Modell.

Dasselbe gilt für photographische Landschaftsbilder, wenn wir für $2A$ die Entfernung der beiden Punkte nehmen, an denen sich der Mittelpunkt des Objectivglases der *Camera obscura* bei den beiden photographischen Aufnahmen befunden hat. Bei der Anordnung des Stereoskops ist darauf zu achten, dass unendlich entfernte Punkte der Photographien mit parallelen Gesichtslinien combinirt werden, und dass die Abstände der Platte von dem Auge oder den Linsen des Stereoskops gleich denen der Platte in der *Camera obscura* von dem Objectivglase derselben sein müssen; sonst bekommt man ein falsches Relief. Beide Bedingungen sind gewöhnlich in den käuflichen Stereoskopen und den dazu gehörigen Bildern nicht erfüllt.

RECKLINGHAUSEN's Normalfläche. Man denke sich ein rechtwinkeliges Coordinatensystem, dessen Mittelpunkt im Fixationspunkte liegt, die xyEbene in der Visirebene; die zxEbene sei die Medianebene des Körpers. Die Coordinaten des rechten Auges seien:

$$x = a \qquad y = b \qquad z = 0,$$

die des linken Auges:

$$x = a \qquad y = -b \qquad z = 0,$$

so dass $2b$ die Distanz der Mittelpunkte beider Augen bezeichnet, a den Abstand des Fixationspunktes von der Verbindungslinie der Augenmittelpunkte.

Die Blicklinie des rechten Auges ist gegeben durch die Gleichungen

$$\frac{x}{a} - \frac{y}{b} = 0 \quad \text{und} \quad z = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1),$$

die Blicklinie des linken Auges durch die Gleichungen

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 0 \quad \text{und} \quad z = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\text{a}).$$

Bildet man aus den beiden Gleichungen 1) durch Multiplication der ersten mit dem constanten Factor p und Addition der zweiten die neue Gleichung

$$p\left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right) + z = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\text{b}),$$

so ist dies die Gleichung einer Ebene, die durch die rechte Blicklinie geht, denn für alle Punkte dieser Blicklinie sind die beiden Gleichungen 1), folglich auch 1 b) erfüllt. Nach bekannten Sätzen ist der Cosinus des Winkels α, den die Normale dieser Ebene mit der zAxe, oder die Ebene selbst mit der Visirebene, $z = 0$, macht, gegeben durch die Gleichung

$$\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{p^2}{a^2} + \frac{p^2}{b^2}}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\text{c}).$$

Bilden wir entsprechend aus den Gleichungen 1 a) die neue

$$-p\left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right) + z = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\text{d}),$$

so geht diese durch die linke Blicklinie und der Werth von $\cos\alpha$ ist für sie derselbe, wie in 1 c).

Aus 1 c) folgt

$$p = \frac{\operatorname{tang}\alpha}{\sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}}$$

oder wenn wir setzen

$$a = r\cos\gamma, \qquad b = r\sin\gamma,$$

wo γ der halbe Convergenzwinkel, und r die Entfernung jedes Auges vom Fixationspunkte ist:

$$p = r\operatorname{tang}\alpha \quad \sin\gamma\cdot\cos\gamma,$$

wonach die Gleichungen 1 b) und 1 d) werden:

$$(x \sin\gamma - y \cos\gamma) \operatorname{tang}\alpha + z = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\,b)$$

$$-(x \sin\gamma + y \cos\gamma) \operatorname{tang}\alpha + z = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\,d).$$

Subtrahirt man die zweite von der ersten, so erhält man

$$x \sin\gamma = 0,$$

das heisst, die Schnittlinie der beiden Ebenen 1 b) und 1 d) liegt in der durch den Fixationspunkt, senkrecht zur Visirebene und zur Medianebene gelegten Ebene $x = 0$, welches auch der Winkel α sei. Diese Schnittlinie sei eine gesehene Linie, dann sind die beiden Ebenen 1 b) und 1 d) die Ebenen ihrer Richtungsstrahlen.

War nun die bisher betrachtete Stellung der Augen eine ohne Raddrehung, so können wir übergehen zu einer Stellung mit Raddrehung, indem wir in 1 b) den Winkel α um δ vergrössern, in 1 d) um ebenso viel verkleinern. Dann bekommen wir für die neue Lage beider Ebenen:

$$\operatorname{tang}(\alpha + \delta) = \frac{z}{y \cos\gamma - x \sin\gamma}$$

$$\operatorname{tang}(\alpha - \delta) = \frac{z}{y \cos\gamma + x \sin\gamma}.$$

Bilden wir hieraus die Tangente der Differenz beider Winkel, so erhalten wir:

$$\operatorname{tang}(2\delta) = \frac{2zx \sin\gamma}{y^2 \cos\gamma^2 - x^2 \sin^2\gamma + z^2}$$

oder

$$z^2 + y^2 \cos^2\gamma - x^2 \sin^2\gamma - 2zx \sin\gamma \cdot \operatorname{cotang}(2\delta) = 0 \quad . \quad . \quad 2),$$

welches die Gleichung eines Kegels ist, dessen Spitze im Mittelpunkt der Coordinaten liegt. Aus der Gleichung 2) erhellt nämlich, dass wenn x, y, z Werthe sind, die der Gleichung 2) genügen, auch nx, ny und nz genügen; daraus folgt, dass jede durch einen Punkt der Fläche 2) und den Anfangspunkt der Coordinaten gezogene gerade Linie ganz in der Fläche 2) liegt, dass diese also ein Kegel ist.

Die in den Gleichungen 1) und 1 a) angegebenen Werthe der Coordinaten für die Blicklinien genügen ebenfalls der Gleichung 2). Die Kegelfläche geht also durch die Blicklinien.

Da nun nach den oben aufgestellten Grundsätzen bei medianem Fixationspunkte die Gesichtsbilder so ausgelegt werden, als wäre keine Raddrehung erfolgt, so werden das vor der Drehung in der Ebene $x = 0$ gezogene Strahlenbündel und das auf dem Kegel der Gleichung 2) gelegene nicht unterschieden werden, und das Strahlenbündel wird also eben oder kegelförmig erscheinen, je nachdem in der ersten oder zweiten Stellung der Augen die Netzhauthorizonte mit der Visirebene zusammenfallen.

Dabei ist noch zu bemerken, dass diejenigen Kanten des Kegels, welche den Blicklinien sehr nahe kommen und also gegen die Augen des Beobachters selbst hingerichtet erscheinen müssten, ein zu kühnes und unwahrscheinliches Relief geben und deshalb besser vermieden werden. Ausserdem ist zu bemerken, dass diejenigen Kanten der Kegelfläche, die zwischen den Augen durchgehen, in den Bildern beider Netzhäute gerade entgegengesetzte Richtung bekommen, und deshalb von ihnen abzusehen ist.

Um die scheinbare Lage von Kreisen zu berechnen, deren Mittelpunkt fixirt wird und deren Ebene senkrecht zur Halbirungslinie des Convergenzwinkels ist,

benutzen wir den Satz, dass, wenn die Gleichung einer Ebene in der Normalform gegeben ist,

$$U = ax + by + cz + d$$

und

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1$$

der Ausdruck U den Abstand des Punktes (x, y, z) von der Ebene $U = 0$ bezeichnet, wobei d den Abstand des Mittelpunkts der Coordinaten von derselben Ebene anzeigt.

Bringen wir die Gleichung 1 b) auf die Form

$$x \sin\gamma \sin\alpha - y \cos\gamma \sin\alpha + z \cos\alpha = U \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3),$$

nehmen wir dazu eine zweite Ebene, die auch durch die Blicklinie geht, in der aber der Winkel α um einen Rechten gewachsen ist und die deshalb auf 3) senkrecht steht,

$$x \sin\gamma \cos\alpha - y \cos\gamma \cos\alpha - z \sin\alpha = V. \quad . \quad . \quad . \quad 3\text{a}),$$

und endlich eine dritte Ebene, die auf der Blicklinie senkrecht steht,

$$x \cos\gamma + y \sin\gamma - r = W \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3\text{b}),$$

so sind U, V, W rechtwinkelige Coordinaten des Punktes (x, y, z) bezogen auf das System dieser drei Ebenen und

$$\frac{1}{m^2} U^2 + \frac{1}{n^2} V^2 = W^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3\text{c})$$

ist die Gleichung eines Kegels zweiten Grades, der seine Spitze im Mittelpunkte des rechten Auges hat und dessen drei Hauptaxen in den Schnittlinien der Ebenen

$$U = 0, \qquad V = 0, \qquad W = 0$$

liegen.

Die Schnittlinie des Kegels 3 c) mit der Ebene, $x = 0$, ist gegeben durch die Gleichung

$$y^2 \cos^2\gamma \left\{\frac{\sin^2\alpha}{m^2} + \frac{\cos^2\alpha}{n^2}\right\} + z^2 \left\{\frac{\cos^2\alpha}{m^2} + \frac{\sin^2\alpha}{n^2}\right\}$$

$$+ 2yz \cos\gamma \cos\alpha \sin\alpha \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

$$= y^2 \sin^2\gamma - 2ry \sin\gamma + r^2.$$

Wenn wir nun verlangen, dass bei derjenigen Raddrehung des Auges, wo $\alpha = 0$, diese Schnittlinie ein Kreis sei, muss sein

$$\frac{\cos^2\gamma}{n^2} - \sin^2\gamma = \frac{1}{m^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3\text{d}).$$

Für symmetrische Stellungen des andern Auges muss gleichzeitig γ und α negativ genommen werden. Setzen wir also

$$\begin{aligned} x \sin\gamma \sin\alpha + y \cos\gamma \sin\alpha + z \cos\alpha &= U' \\ -x \sin\gamma \cos\alpha - y \cos\gamma \cos\alpha + z \sin\alpha &= V' \\ x \cos\gamma - y \sin\gamma - r &= W', \end{aligned}$$

so ist

$$\frac{1}{m^2} U'^2 + \frac{1}{n^2} V'^2 = W'^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3\text{e})$$

die Gleichung eines entsprechenden Kegels, dessen Axe die Blicklinie des zweiten Auges ist, dessen Spitze im Mittelpunkte dieses Auges liegt, und der, wenn $\alpha = 0$ gemacht wird, die Ebene $x = 0$ und die ihr parallelen Ebenen ebenfalls in einem Kreise schneidet, wie der Kegel 3 c).

Ist nun die Stellung der Augen $\alpha = 0$ eine mit Raddrehung verbundene Stellung derselben, und die Schnittlinie der beiden Kegel ein objectiv vorhandener Kreis, so wird das Netzhautbild nach den oben gegebenen Regeln so gedeutet, als wären dieselben Netzhautbilder ohne Raddrehung erhalten worden. Das scheinbar vorhandene Object muss also eine Schnittlinie der Kegel 3 c) und 3 e) sein. Wenn wir deren Gleichungen von einander subtrahiren, so bleiben nur diejenigen Glieder stehen, welche in beiden verschiedenes Vorzeichen haben, diese sind:

$$- \frac{1}{m^2} y \cos\gamma \sin\alpha \,(x \sin\gamma \sin\alpha + z \cos\alpha)$$

$$- \frac{1}{n^2} y \cos\gamma \cos\alpha \,(x \sin\gamma \cos\alpha - z \sin\alpha)$$

$$= y \sin\gamma \,(x \cos\gamma - r).$$

Diese Gleichung wird erfüllt, wenn entweder

$$y = 0$$

oder

$$x \sin\gamma \cos\gamma \left[\frac{\sin^2\alpha}{m^2} + \frac{\cos^2\alpha}{n^2} + 1\right] + z \cos\gamma \cos\alpha \sin\alpha \left[\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right] = r \sin\gamma.$$

Die erste Schnittlinie läge also in der Medianebene, und wird sich nicht leicht als Object darstellen, die Ebene der zweiten wird mit Berücksichtigung der Gleichung 3 d)

$$x\,(1 - \sin^2\alpha \sin^2\gamma) - z \sin\gamma \sin\alpha \cos\alpha = \frac{rn^2}{(n^2 + 1) \cos\gamma} \quad \ldots \quad 3\text{f}).$$

Für den Fall, dass $\alpha = 0$, wird diese Gleichung

$$x = \frac{rn^2}{(n^2 + 1) \cos\gamma} = x_0.$$

Die Schnittlinie der beiden Kegel liegt also in diesem Falle in der Entfernung x_0 vor der Ebene, $x = 0$, in einer dieser parallelen Ebene, und ist ein Kreis. Wenn α nicht gleich Null ist, ist die Ebene der Schnittlinie geneigt gegen die Ebene $x = 0$ um einen Winkel η, dessen Tangente ist

$$\operatorname{tang} \eta = \frac{\sin\gamma \sin\alpha \cos\alpha}{1 - \sin^2\gamma \sin^2\alpha}$$

und sie schneidet die Visirebene $z = 0$ in der Linie

$$x = \frac{x_0}{1 - \sin^2\alpha \sin^2\gamma},$$

also etwas entfernter vom Auge, als vorher. Die Schnittlinie ist in diesem Falle eine Ellipse.

Die nahehin verticalen Axenebenen der beiden Kegel

$$V = 0 \quad \text{und} \quad V' = 0$$

schneiden sich in der geraden Linie, deren Gleichungen sind

$$\left.\begin{aligned} x \sin\gamma &= y \operatorname{tang}\alpha \\ y &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ 4),$$

für $\alpha = 0$ werden die Gleichungen dieser Linie

$$x = 0, \qquad z = 0.$$

Eine zur Visirebene senkrechte Linie erscheint also bei der Raddrehung α beider Augen gegen die Ebene $x = 0$ geneigt unter dem Winkel $\eta_{\prime}'$, dessen Tangente ist

$$\operatorname{tang}\eta_1 = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha \cdot \sin\gamma}.$$

Wenn nun die Winkel α und γ, wie dies bei den praktisch ausführbaren Versuchen immer der Fall sein wird, klein sind, so ist

$$\operatorname{tang}\eta_{\prime}' > \operatorname{tang}\eta.$$

Der senkrechte Durchmesser des Kreises erscheint also stärker gegen die Ebene $x = 0$ geneigt, als die Ebene des Kreises, und daher scheint er sich vom Kreise zu lösen, wie dies Recklinghausen beobachtet hat. Da gerade die horizontal verlaufenden Theile der Kreislinie nur eine sehr unbestimmte binoculare Localisation geben, so kann der Kreis auch verbogen erscheinen, wo der Durchmesser ihn schneidet, ohne sich von ihm zu lösen.

Betrachtet man nicht einen Kreis, sondern Ellipsen, so findet die Gleichung 3 d) nicht statt, und man findet, dass Ellipsen mit längerer verticaler Axe sich im Sinne einer verticalen Linie neigen müssen, dieser desto näher kommend, je schmaler sie sind. Ellipsen dagegen mit längerer horizontaler Axe neigen sich entgegengesetzt, auch um so stärker, je schmaler sie sind.

Abänderung des Linsenstereoskops von Helmholtz. Da die Entfernung entsprechender Punkte in den gewöhnlichen photographischen Stereoskopenbildern nicht immer gleich der der Augen ist, sie zuweilen auch verschiedene Höhe über der Grundlinie haben, so muss man, um eine möglichst natürliche Projection der Objecte zu erreichen, das Instrument jedem Bilde adaptiren können. In einem Stereoskop, was ich von Herrn Oertling in Berlin erhalten hatte, war dies in einfachster Weise dadurch erreicht, dass zwei prismatische Linsen in zwei cylindrischen, drehbaren Röhren sassen. Je nachdem man den brechenden Winkel der Prismen mehr nach einwärts oder nach auswärts stellte, konnte man eine grössere oder geringere Convergenz der Augen hervorbringen und auch Höhenunterschiede corrigiren. In anderer Weise, wobei die Einstellung leichter wird und die Unregelmässigkeiten der Brechung in prismatischen Gläsern möglichst klein bleiben, habe ich denselben Zweck erreicht in dem in *Fig. 197* (S. 680) perspectivisch und in *Fig. 198* im Querschnitt in $^2/_5$ der natürlichen Grösse dargestellten Instrumente. Der Zweck desselben ist namentlich auch stärkere Vergrösserungen anwenden zu können, als die gewöhnlichen Stereoskope geben, wobei man einen dem natürlichen noch mehr entsprechenden Eindruck erreicht. Doch ist zu bemerken, dass fast nur Photographien auf Glas eine solche stärkere Vergrösserung ertragen. Der Kasten ist ähnlich dem des Stereoskops von Brewster mit prismatischen Linsen eingerichtet; durch die Schlitze parallel der Bodenplatte AA, welche selbst grösstentheils durch eine mattgeschliffene Glasplatte gebildet ist, wird das Bild eingeschoben. Der Beschauer blickt durch die beiden cylindrischen Röhren $B_0\, B_1$, welche nur centrirte Convex-

linsen, nicht Prismen [1], enthalten, darauf hin. Beide Röhren enthalten zunächst dem Auge eine Linse von 12 Centimeter Brennweite und gegen ihr unteres Ende hin eine solche von 18 Centimeter Brennweite. Die letztere kann ausgeschraubt werden, wenn man nur die gewöhnliche Vergrösserung der Stereoskope zu haben wünscht, bei welcher aber die Bilder (Landschaften) meist kleiner erscheinen als das wirkliche Object dem unbewaffneten Auge von dem betreffenden Standpunkte aus erscheinen würde. Jede der Röhren B_0 und B_1 sitzt in einem zwischen Schienen verschiebbaren rechtwinkeligen Schlitten, so dass B_0 in der Richtung von oben nach unten (beziehlich zum Beobachter), B_1 dagegen von rechts nach links verstellt werden kann durch Drehung der Schrauben C_0 und C_1. In *Fig. 197* ist dargestellt, wie die Schrauben auf die Schlitten wirken, C_1 unmittelbar, C_0 mittels eines Winkelhebels.

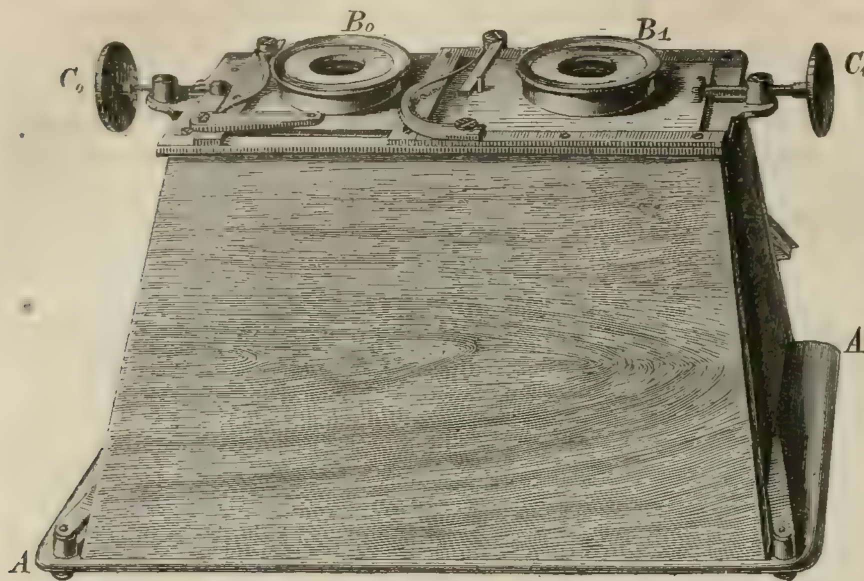


Fig. 197.

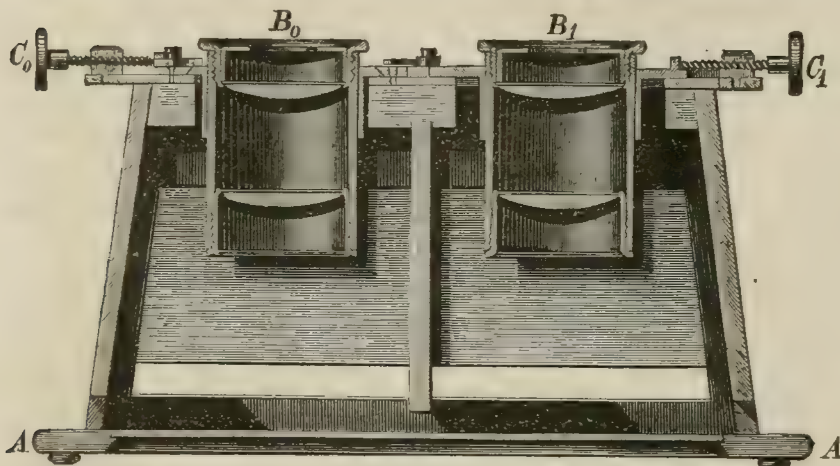


Fig. 198.

Ich pflege die Röhren erst so weit herauszuziehen, bis das photographische Bild im Brennpunkte der Concavlinsen steht, was sich leicht erkennen lässt, wenn man von unten auf die matte Glasplatte blickt und das Bild entfernter heller Objecte auf der Fläche der stereoskopischen Darstellung auffängt. Ist der Beschauer kurzsichtig, so lasse ich ihn lieber durch die ihm gewöhnte Brille hineinsehen. Dadurch dass man das Bild in den Brennpunkt der Linsen bringt, hat man den Vortheil, dass es erstens auch bei Bewegungen des Kopfes vor den Gläsern wie ein unendlich entferntes Object erscheint; zweitens dass die Deckung der Bilder auch nicht gestört wird, wenn der Beobachter den Kopf nach der Seite neigt. Namentlich also, wenn man das Stereoskop fest aufstellt und den Beschauer davor treten lässt, um hindurchzusehen, so erhält er, was die Formen betrifft, in allen Beziehungen denselben optischen Eindruck, als blickte er nach den entfernten reellen Objecten. Die Schrauben C_0 und C_1 werden dann gebraucht, um den Stand der beiden optischen Bilder zu corrigiren. Indem ich meine Augen etwas convergiren lasse, erzeuge ich Doppelbilder von irgend einem hell hervortretenden Objecte, und sehe zu, ob diese gleich hoch neben einander stehen; wenn nicht, so corrigire ich mit der Schraube C_0 so lange, bis dies der Fall ist. Die Einstellung in den Brennpunkt kann man dann noch genauer controlliren, wenn man seitliche

[1] Auch Herr Claudet hat bemerkt (*Proc. Royal Soc.* VIII, 104—110), dass es richtiger ist und natürlichere Bilder giebt, wenn man Landschaftsbilder durch Linsen mit parallelen Gesichtslinien combinirt.

Neigungen des Kopfes macht. Um annähernd die richtige Convergenz hervorzubringen, gehe ich mit dem Kopfe etwas zurück von den Gläsern, blicke über das Stereoskop fort nach wirklichen Gegenständen und vergleiche deren Entfernung mit der scheinbaren der Objecte im Stereoskop. Danach lässt sich dann mittels der Schraube C_1 leicht die nöthige Correction machen.

Die Objecte erscheinen durch ein solches Instrument gesehen bei richtiger Einstellung nicht nur viel grösser und viel entfernter, sondern auch körperlicher als durch die gewöhnlichen Instrumente, welche fast immer zu starke Convergenz verlangen und deshalb die Gegenstände als Basreliefs erscheinen lassen. Man hat auch den sehr wesentlichen Vortheil, dass man die sonst so leicht eintretende Ermüdung und Schmerzhaftigkeit der Augen hierbei gänzlich vermeiden kann.

Ausser dem schon genannten Spiegelstereoskop von Wheatstone, dem Linsenstereoskop von Brewster in seinen verschiedenen Modificationen, dem Pseudoskop, welches auch gebraucht werden kann, um je zwei Zeichnungen mit einander zur Deckung zu bringen, können auch stereoskopische Wirkungen mit nur einer Zeichnung und einem Prisma erzeugt werden [1]. Wenn die Zeichnung nämlich einen zur Medianebene des Beschauers symmetrisch gebildeten Gegenstand darstellt, so wie er vom rechten Auge gesehen wird, so würde die entsprechende Ansicht des linken Auges ihr symmetrisch oder ihrem Spiegelbilde congruent sein. Statt der zweiten Zeichnung kann man also auch wirklich ein Spiegelbild der ersten setzen, indem man mit dem linken Auge durch ein rechtwinkeliges Glasprisma parallel dessen Hypotenusenfläche hindurchsieht, wobei, wie mehrfach schon erwähnt ist, der Beschauer ein in der Hypotenusenfläche durch totale Reflexion entworfenes Spiegelbild des Objectes sieht. Das rechte Auge blickt inzwischen direct nach der Zeichnung. Wenn man die Bilder beider Augen zum Decken bringt, sieht man das körperliche Relief. Nimmt man das Prisma vor das linke Auge, so sieht man das umgekehrte Relief. Man kann auf diese Weise oft Zeichnungen zu stereoskopischen Effecten benutzen, die gar nicht dazu bestimmt sind, wie zum Beispiel photographische Porträts, welche von vorn mit einer sehr kleinen Abweichung nach einer Seite hin aufgenommen worden sind.

Aehnliche stereoskopische Effecte erreichte Dove [2], indem er nach einer passenden Zeichnung mit einem astronomischen und einem Galilei'schen Fernrohr von gleicher Vergrösserung hinsah. Ersteres kehrt die Zeichnung um, letzteres nicht. Man kann hierzu dieselben Zeichnungen brauchen, wie für das einfache Prismenstereoskop, nur muss die obere Hälfte des dargestellten Körpers auch mit der untern symmetrisch sein.

Das einfachere Telestereoskop ohne Vergrösserung habe ich oben beschrieben; ich habe ein ähnliches Instrument mit zwei Fernröhren construiren lassen, mit welchem man entfernte Gegenstände in ihrer körperlichen Form stereoskopisch sehen kann. Der optische Theil des Instruments ist dargestellt auf *Taf. IV, Fig. 3*. Das Licht, was von den Objecten kommt, wird zunächst aufgefangen durch die beiden ebenen Spiegel $a\,a$ und $a_1\,a_1$. Diese Spiegel müssen aber von der grössten Vollendung sein, weil sie sonst bei der Vergrösserung durch die Fernröhre verzerrte Bilder geben. Durch drei Schrauben werden sie gegen die Platte k und k' angezogen, während zwischen ihnen und der Platte Federn liegen, die sie so weit entfernen, als die Schrauben es zulassen. Mittels der Schrauben kann man die Stellung der Spiegel so weit abändern, dass die Bilder beider Seiten zusammenfallen. Die Objectivlinsen der Fernröhre liegen bei c und c'. Sie sind in Röhren eingesetzt, welche mittels der gezahnten Triebe i und i', die in gezahnte Stangen h und h' eingreifen, hin und hergeschoben werden können, um die Focaldistanz des Fernrohrs reguliren zu können. Zwei Ocularlinsen eines terrestrischen Oculars liegen bei d und e. Dann fällt das Licht auf das Prisma b, um in den Seitenröhren auf die dritte und vierte Ocularlinse g zu fallen. Das Prisma b kann mittels der in den dahinter liegenden Metallklotz p eingreifenden Schraube verschoben

---

[1] Dove Poggend. Ann. LXXXIII, 183. Berliner Monatsberichte. 1850, p. 152. Brewster *Phil Mag.* (4) III, 16—26. *Rep. of Brit. Assoc.* 1849, 2, p. 5.

[2] Poggend. Ann. LXXX, 446. Berliner Monatsberichte. 1850, p. 152.

werden, um die optische Axe der beiden Theile des Fernrohrs in Uebereinstimmung zu setzen. Endlich dient der gezahnte Trieb *m* dazu die beiden Ocularröhren mit den ganzen Fernröhren von einander zu entfernen oder einander zu nähern, um sie der Augendistanz des Beobachters anzupassen.

Da die Entfernung der Spiegel an dem Instrumente 1080 Millimeter beträgt, so ist sie 16 mal grösser als die der menschlichen Augen, und die stereoskopischen Unterschiede werden also 16 mal grösser, als für die unbewaffneten Augen. Da die Vergrösserung auch eine sechszehnmalige ist, so ist die Wirkung des Instruments die, als sähe man das Object mit unbewaffneten Augen aus einer sechszehnmal kleineren Entfernung, als man es wirklich sieht.

Den entgegengesetzten Effect von dem telestereoskopischen erhält man nach einer Bemerkung von OPPEL [1], wenn man zwei einander congruente Körper in der Entfernung der Augen von einander, beide gleich gerichtet, aufgestellt und mit parallelen Gesichtslinien betrachtet.

Stereoskopisches Mikroskop. Ein solches nach NACHET's neuerer Construction ist dargestellt in *Fig. 199.* Bei *a* ist das Objectivlinsensystem. Das durchtretende Strahlenbündel trifft zunächst auf das kleine reflectirende Glasprisma bei *b*, die eine Hälfte des Strahlenbündels geht an diesem vorbei und durch das Rohr *E* zum Ocular *e*, um in das eine Auge des Beobachters zu fallen. Die andere Hälfte des Strahlenbündels dagegen, welche in das beinahe rechtwinkelige Prisma *b* eintritt, wird von dessen Hypotenusenfläche reflectirt und gegen das zweite Prisma *c* hin geworfen, um hier noch einmal reflectirt zu werden in das Rohr *F* hinein und zum Ocular *f*, durch welches es in das andere Auge des Beobachters fällt. Mittels der Schraube *g* kann das ganze Rohr *F* mit dem Prisma *c* dem Rohre *E* genähert oder von ihm entfernt werden, um das Instrument dem Abstande der beiden Augen des jedesmaligen Beobachters anzupassen. Da die Lichtbündel, welche aus den Ocularen *e* und *f* austreten, sehr schmal sind, so muss ihre Entfernung der der Pupillen genau gleich sein, damit beide Augen ein Bild empfangen. In den englischen Instrumenten ähnlicher Art sind beide Röhren fest verbunden, und die Accommodation für die Augendistanz des Beobachters wird dadurch erreicht, dass man die Ocularstücke der Röhren mehr oder weniger herauszieht.

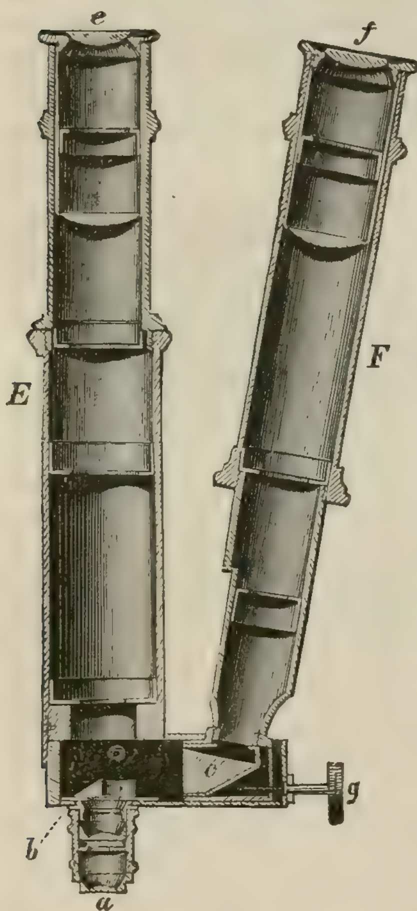


Fig. 199.

Die stereoskopische Wirkung bei diesen Instrumenten ist sehr auffallend und erleichtert die Beobachtung von Objecten verwickelterer Form ausserordentlich. Sie kommt vermittels ganz anderer Umstände zu Stande als in den übrigen stereoskopischen Instrumenten. Wir haben in diesem Falle nämlich keine von zwei verschiedenen Standpunkten aus aufgenommenen Bilder des Objects, da das eine Objectivlinsensystem des Mikroskops die beiden Bilder für beide Augen entwirft und nur die eine Hälfte des Lichts an das eine Auge, die andere an das andere vertheilt wird. Eine stereoskopische Wirkung kommt hier nur deshalb zu Stande, weil allein die Punkte der Focalebene des Mikroskops ein punktförmiges Bild geben; alle Punkte aber, die vor oder hinter der Focalebene liegen, geben kleine Zerstreuungskreise, und wegen der Halbirung des Strahlenbündels fällt die eine Hälfte eines jeden Zerstreuungskreises in das rechte, die andere in das linke Auge. Da nun die rechte Hälfte des Zerstreuungskreises anders liegt als die linke, so kommt dadurch eine stereoskopische Wirkung zu Stande.

---

[1] Jahresbericht des Frankfurter Vereins 1858—59. p. 64—75.

Nach den auf Seite 56 bis 59 gegebenen Regeln können die Hauptpunkte und Brennpunkte des ganzen optischen Systems eines Mikroskops leicht gefunden werden. Der erste Hauptpunkt liegt unterhalb des Objectivglases, der erste Brennpunkt ebenfalls, aber dem Objectiv näher. Der zweite Haupt- und Brennpunkt liegen oberhalb des Oculars, und zwar wieder der Brennpunkt diesem näher. Das Auge des Beobachters können wir uns im zweiten Brennpunkte befindlich denken und p die Brennweite des ganzen Systems nennen. Sind nun f und φ die Entfernungen beziehlich des Objects vom ersten Brennpunkte nach oben und des Bildes vom zweiten Brennpunkte nach unten, so ist nach S. 49 Gleichung 7 b)

$$\varphi = \frac{p^2}{f}.$$

Bezeichnet b die Grösse des Objects, β die seines Bildes, so ist

$$\frac{\beta}{b} = \frac{p - \varphi}{f - p} = \frac{p}{f} = \frac{\varphi}{p}.$$

Denken wir uns nun das Auge accommodirt für das Bild β, und vor oder hinter dem Gegenstande b noch ein anderes Object b', welches, da jenes erste durchsichtig ist, mit ihm zugleich gesehen werden kann, und dessen Entfernung vom Brennpunkte f' sein mag, so ist die Entfernung seines Bildes vom Auge und vom zweiten Brennpunkte

$$\varphi' = \frac{p^2}{f'},$$

woraus folgt

$$\varphi' - \varphi = p^2 \cdot \frac{f - f'}{ff'}.$$

Der Winkel, unter dem die Strahlen vom Bilde b aus in das Objectivglas fallen, sei a, der zugehörige Divergenzwinkel der Strahlen des Bildes β sei α, so ist nach Seite 50, Gleichung 7 d) und Seite 54, Gleichung 9)

$$b \operatorname{tang} a = \beta \operatorname{tang} \alpha$$

oder

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{f}{p} \operatorname{tang} a$$

und ebenso für die Bilder b' und β' nebst den zugehörigen Divergenzen der Strahlen a' und α' ist

$$\operatorname{tang} \alpha' = \frac{f'}{p} \operatorname{tang} a'.$$

Der Radius ϱ des Zerstreuungskreises in der Ebene des Bildes β, für welche das Auge accommodirt ist, ist, wie leicht ersichtlich,

$$\varrho = (\varphi' - \varphi) \operatorname{tang} \alpha' = \frac{p}{f} (f - f') \operatorname{tang} a'.$$

Da nur Gegenstände beobachtet werden können, für welche der Zerstreuungskreis sehr klein ist, also $\varphi' - \varphi$ und $f' - f$ sehr klein sind, so kann die Veränderlichkeit des Winkels a' für verschiedene sichtbare Objecte und sein Unterschied vom Winkel a vernachlässigt werden, und wir können deshalb unter dieser Beschränkung die letzte Gleichung schreiben

$$\varrho = \frac{p \operatorname{tang} a}{f} \cdot (f - f').$$

Nun fällt von diesem Zerstreuungskreise bei der beschriebenen Einrichtung des stereoskopischen Mikroskopes die eine Hälfte in das rechte, die andere in das linke Auge. Dadurch wird jede zur Visirebene verticale Linie des Bildes, sei sie nun isolirt gezogen oder Theil einer gleichmässig gefärbten Fläche, verwandelt in einen Streifen von der Breite ϱ,

so dass die Verbreiterung in dem einen Bilde nach rechts hin, im anderen nach links hin geschieht. Zwei solche Streifen haben also in den beiden Bildern eine stereoskopische Parallaxe gleich ϱ im Vergleich mit den Punkten der Focalebene.

Ist f' kleiner als f, liegt also das Object weiter vom Objectivglase als diejenigen Punkte, für deren Bild das Auge accommodirt ist, so ist φ' grösser als φ, das heisst das Bild von b' liegt unterhalb des Bildes von b, und in der Ebene von b sind die Strahlen des Bildes b' schon gekreuzt. Dann fällt die rechte Hälfte des Zerstreuungskreises in das rechte Auge des Beobachters, die linke in das linke Auge, die stereoskopische Parallaxe ist also negativ, verglichen mit der des Bildes b, und b_1 scheint, wie es wirklich liegt, hinter b zu liegen. Dabei gelangt die eine Hälfte des Zerstreuungskreises durch doppelte Spiegelung in das entsprechende Auge des Beobachters und erscheint deshalb nicht von rechts nach links verkehrt, sondern in natürlicher Lage.

Umgekehrt verhält sich alles, wenn das Object b' oberhalb b liegt.

In den Instrumenten von Nachet kann man den Schieber, der die Prismen enthält, so weit hervorziehen, dass das kleine Glasprisma b der *Fig. 199* vor die andere (rechte) Hälfte der Oeffnung tritt, dann erhält man einen pseudoskopischen Effect; was in Wirklichkeit unten liegt, erscheint dann oben.

Aehnlich wirkt der binoculare Augenspiegel, welcher in *Fig. 200* nach Nachet's Construction abgebildet ist. A ist ein Concavspiegel von Glas, von dessen Mitte die Be-

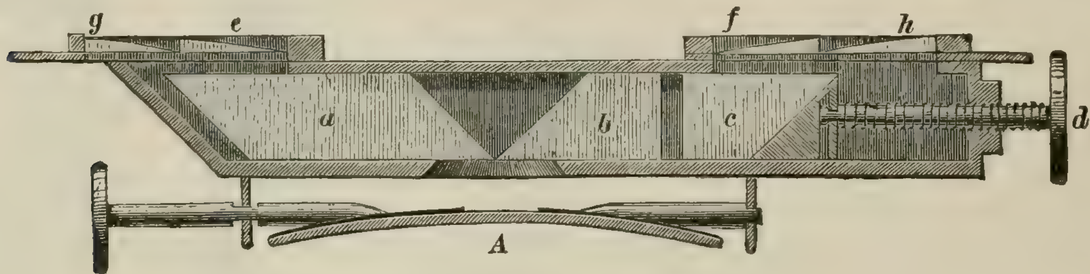


Fig. 200.

legung weggenommen ist. Die vordere und hintere Fläche des Glases haben gleiche Krümmung, so dass es die Strahlen ungebrochen durchgehen lässt. Der Spiegel dient zur Beleuchtung des zu beobachtenden Auges. Zwischen ihn und das Auge wird eine Convexlinse gehalten, deren reelles umgekehrtes Bild der Beobachter betrachtet, wie in dem auf Seite 178 *Fig. 94* schematisch dargestellten Versuche. Das Licht, welches vom beobachteten Auge kommt, theilt sich hinter der Oeffnung, indem es auf die beiden reflectirenden Prismen a und b fällt. Das Prisma a hat einen parallelogrammatischen Querschnitt; zwei seiner Winkel sind gleich halben Rechten. Die Prismen b und c zusammengenommen bilden ein Prisma von derselben Gestalt, wie a, welches aber quer durchschnitten ist, damit man den Theil c mittels der Schraube d dem andern Theil b nähern und davon entfernen kann. Dadurch wird das Instrument der Augendistanz des Beobachters angepasst. Die Strahlen, welche durch die mittlere Oeffnung zuerst rechtwinkelig in die vordere Fläche des Prisma a eingetreten sind, werden dann von der kleinen Seite des Parallelogramms gegen die zweite nach aussen gekehrte kleine Seite reflectirt, und von dieser letztern zum zweiten Male reflectirt gegen die Oeffnung e hin, und treten durch diese aus in das eine Auge des Beobachters. Die zweite Hälfte der Strahlen, welche in das Prisma b eintreten, werden ebenso von dessen geneigter Fläche gegen die geneigte Fläche von c reflectirt, und von dieser gegen die Oeffnung h hin, um in das zweite Auge des Beobachters zu fallen. In die Oeffnungen e und h sind schwach brechende Prismen eingesetzt, damit der Beobachter mit schwach convergenten Blicklinien das gemeinsame Bild betrachten kann. Die Prismen sitzen in je einem Schieberchen, welches ausserdem noch zwei andere Prismen mit convexen Flächen enthält, die, wenn sie vorgeschoben werden, zugleich vergrössernd wirken.

Die vortheilhafteste Stellung der Convexlinse, durch welche man beobachtet, ist, wenn sie ein Bild der Pupille des beobachteten Auges auf die Oeffnung des Spiegels wirft, wie auf

Seite 179 bis 181 erörtert ist. Unter diesen Umständen fällt das Licht, was durch die rechte Hälfte der Pupille kommt, in das links gelegene Prisma *a*, und das von der linken Seite der Pupille kommende in das rechts gelegene Prisma *b*. Das rechte Auge des Beobachters sieht also den Hintergrund des beobachteten Auges, wie er von der linken Hälfte der Pupille aus erscheint, das linke Auge, wie er von ihrer rechten Hälfte aus erscheint. Da das Bild übrigens auch verkehrt ist, so giebt dies einen richtigen stereoskopischen Effect, der sehr merklich und für die medicinische Beobachtung des Augenhintergrundes sehr nützlich ist.

Schliesslich will ich hier noch die eigenthümliche Methode der Stereoskopie von Rollmann [1] erwähnen. Er zeichnet beide Projectionen auf dieselbe schwarze Tafel, die eine mit rothen Linien, die andere mit blauen. Dann nimmt er vor das eine Auge ein rothes Glas, vor das andere ein blaues und sieht nun mit jenem nur die rothen Linien, mit diesem nur die blauen, die sich dann zum Relief verbinden lassen. Wenn man blaue und rothe Gläser vertheilt, kann man eine solche Zeichnung vielen Personen zu gleicher Zeit zeigen. Herr J. C. d'Almeida entwirft die betreffenden Bilder mittels zweier Linsen, vor deren eine ein rothes, vor die andere ein grünes Glas eingeschaltet ist, auf einen Schirm.

Es können übrigens die verschiedenartigsten brechenden und spiegelnden Apparate gebraucht werden, um die für stereoskopische Zwecke gewünschte Verschiebung der Bilder hervorzubringen, wobei bald beide, bald nur ein Bild verschoben wird. Wie Wheatstone ursprünglich zwei Planspiegel benutzt hat, so hat Brewster [2] ein ähnliches mit zwei Spiegeln, ein anderes mit einem Spiegel, das letztere entweder mit einer oder zwei Zeichnungen beschrieben. Statt der Spiegel können auch, wie Dove [3] und Brewster vorgeschlagen haben, total reflectirende Prismen, eines oder zwei, im letzteren Falle wieder je eines vor ein Auge, oder beide zum Reversionsprisma verbunden, vor ein Auge gestellt, gebraucht werden. Ebenso genügt ein schwach brechendes Prisma mit ebenen Flächen, um eines der Bilder bis zur Deckung mit dem andern zu verschieben. E. Wilde [4] brauchte zu demselben Zweck das doppelt reflectirende Prisma einer *Camera lucida*.

Um ohne Ablenkung der Lichtstrahlen die Combination stereoskopischer Bilder zu erzielen, schlägt Brewster vor, vor sie eine Glasplatte mit einem schwarzen Fleckchen, welches man fixirt, in passender Entfernung zu halten. Herr Faye [5] wendet einen Schirm mit zwei Löchern an, so dass jedes Auge nur die zugehörige Zeichnung sieht, Herr Elliot [6] zwei gekreuzte Röhren, durch die das rechte Auge das linke Bild sieht und umgekehrt. Zu bemerken ist, dass wegen der Schwierigkeit die passende Accommodation herzustellen weitsichtige Beobachter leichter bei gekreuzten Gesichtslinien, kurzsichtige bei ungekreuzten combiniren.

J. Duboscq [7] hat prismatische Linsen in ein Opernguckerstativ gesetzt und dadurch die an der Wand hängende Doppelzeichnung betrachtet, so dass man durch Näherung und Entfernung die Convergenz der Augenaxen verändern kann, wodurch das Relief vergrössert oder verkleinert wird. — Um beliebig grosse Bilder zu combiniren, stellt er in seinem Panoramenstereoskop die Bilder über einander und zwei, um eine horizontale Axe drehbaren, neben einander stehenden Spiegeln gegenüber. Der Beobachter blickt zwischen den Bildern oder unter ihnen hindurch nach den Spiegeln, die so gestellt sind, dass die entsprechenden Theile der Bilder sich decken. Die Bilder können beliebig breit gemacht werden und vor den Augen des Beobachters vorbeigleiten. Eine andere Form zur Combination grosser Bilder, die dem Stereoskop von Brewster ähnlicher ist, mit achromatischen ebenflächigen Prismen und davon getrennten Linsen, beide verschiebbar um Correctionen des Bildes auszuführen, hat Herr Duboscq später beschrieben [8].

---

1 Poggend. Ann. XC, 186—187.
2 *Phil. Magaz.* (4) III, 16—26.
3 Poggend. Ann. LXXXVIII, 183.
4 Poggend. Ann. LXXXV, 63—67.
5 *Comptes rendus.* XLIII, 673—674. Poggend. Ann. XCIX, 641—642.
6 *Phil. Mag.* (4) XIII, 78.
7 *Cosmos.* I, 97—104; 703—705.
8 *Comptes rendus.* XLIV, 148—150.

In das Panoramenstereoskop können statt der Bilder nun auch rotirende stroboskopische Scheiben eingesetzt werden, so dass man die bewegten Figuren auch körperlich sieht. Diese Einrichtung giebt das Stereophantaskop oder Bioskop. Ein Instrument, was dasselbe Resultat giebt, hat Herr CZERMAK [1] unter dem Namen Stereophoroskop beschrieben. Er wählte dazu das gewöhnliche Linsenstereoskop, für welches beide Bilder auf einen und denselben Pappstreifen neben einander geklebt werden. Diese Pappstreifen mit ihren je zwei Bildern wurden an den Seitenflächen eines mehrseitigen um eine horizontale Axe drehbaren Prisma befestigt. Um das Prisma herum in der Entfernung von einigen Zollen von den Bildern läuft noch ein Gürtel von Pappdeckelstücken, in welche die nöthigen Oeffnungen eingeschnitten sind, um in den richtigen Momenten die Zeichnungen zu sehen. Ausserhalb dieses Gürtels wird die Prismencombination eines BREWSTER'schen Stereoskops festgestellt, so dass der Beobachter durch sie und durch die vorbeipassirenden Spalten nach den Bildern hinsehen kann.

Herr C. CLARKE [2] hat das BREWSTER'sche Stereoskop mit einem Fusse versehen, Herr KILBARN [3] es zum Zusammenlegen eingerichtet. SMITH und BECK [4] haben einen Fuss, eine festere Bahn für die Bilder, reichlichere Beleuchtung von allen Seiten, achromatische Linsen angebracht, SAMUEL [5] eine Vorrichtung, um die Entfernung der Bilder von den Linsen der Sehweite des Beobachters anzupassen.

Eigenthümlich ist die Einrichtung von CLAUDET's Stereomonoskop [6]. Er bemerkte, dass die Bilder einer *Camera obscura*, auf einer mattgeschliffenen Glasplatte entworfen und binocular betrachtet, etwas stereoskopisches Relief zeigen. Die Erscheinung erklärt sich dadurch, dass jedes Auge auf der matten Glasplatte diejenigen Strahlen am stärksten sieht, welche in Richtung seiner eigenen Gesichtslinie auffallen. Er construirte darauf das Stereomonoskop, welches mittels zweier Linsen zwei zusammengehörige stereoskopische Bilder auf dieselbe Stelle einer matten Glasfläche entwirft. Wenn die Glasplatte binocular betrachtet wird, sieht jedes Auge nur das für dasselbe bestimmte Bild, und es entsteht der Eindruck des Reliefs.

Um Veränderungen in der Stellung der Bilder für Untersuchungen über den optischen Effect solcher Verschiebungen vornehmen zu können, hat WHEATSTONE [7] an seinem oben beschriebenen Spiegelstereoskope die parallelen Wände, an denen die Bilder aufgestellt sind, auf Schlitten verschiebbar gemacht; ausserdem sind die beiden Arme des Stereoskops drehbar um eine feste Axe zwischen den beiden Spiegeln, so dass man den Convergenzwinkel der Augen verändern kann. Herr HARDIE [8] hat zu ähnlichem Zwecke, um pseudoskopische Reliefs hervorzubringen, ein dem später von mir construirten und oben beschriebenen Telestereoskope ähnliches Instrument mit zwei Spiegelpaaren construirt. Man kann damit die Bilder bald verkehrt, bald in ihrer wahren Lage zeigen, das Relief übertreiben, schwächen oder umkehren. Herr H. MEYER [9] hat zu demselben Zwecke die Bilder des WHEATSTONE'schen Spiegelstereoskops nach ihrer Fläche verschiebbar gemacht, und eine Scale zur Messung der Verschiebungen hinzugefügt. Doch hat die von WHEATSTONE vorgeschlagene Einrichtung, wo sich die Bilder im Kreise bewegen und ihr Abstand von den Augen ganz unverändert gelassen werden kann, wohl den Vortheil, dass sie bei Seitenverschiebungen der Bilder die Netzhautbilder derselben ganz unverändert lässt, während bei MEYER's Einrichtung kleine Correctionen wegen der Veränderlichkeit des Abstandes der Bilder von den Augen bei Verschiebungen längs einer ebenen Fläche berechnet werden müssen.

Aehnliche Veränderungen [10] der Convergenz bei der Betrachtung wirklicher Körper hat

---

[1] Wiener Berichte. XV, S. 463—466. Ein anderes ähnliches Instrument *Stereotrope* von SHAW in *Proc. Royal Soc.* XI, 70—73.
[2] *Cosmos.* III, 123.
[3] *Cosmos.* III, 770.
[4] *Athenaeum.* 1858, II, 269—270. *London J. of Arts.* Juni 1860.
[5] *Rep. of Brit. Assoc.* 1858, 2, p. 19.
[6] *Proc. Royal Soc.* IX, 194—196.
[7] *Phil. Transact.* 1852, p. 1—17.
[8] *Phil. Magaz.* (4) V, 442—446.
[9] Poggendorff's Annalen. LXXXV, 198—207.
[10] Wiener Sitzungsber. XLII, 488—502.

Rollet erreicht, indem er vor jedes Auge schräg gerichtet eine planparallele dicke Glasplatte stellte. Je nachdem deren vordere Flächen der Nasenseite oder der Schläfenseite des betreffenden Auges zugekehrt sind, machen sie die Blicklinien divergenter oder convergenter. Die Erscheinungen waren dabei den Erfahrungen von Wheatstone entsprechend.

Stereoskopenbilder sind theils durch perspectivische Construction der betreffenden Zeichnungen verfertigt und durch Lithographie oder Kupferstich vervielfältigt worden [1], theils durch Photographie. Unter den ersteren sind nur die nicht schattirten Linienzeichnungen geometrischer Gestalten, regelmässiger Körper oder Krystallmodelle von guter Wirkung. Sie sind gleichzeitig die evidentesten Beispiele der stereoskopischen Wirkungen, da hier alle Mittel der Beleuchtung und Schattirung fehlen, welche die Täuschung unterstützen könnten. Zu ihrer Construction gehört aber eine ausserordentliche Genauigkeit, wenn sie nicht verzerrt aussehen sollen, da schon die allerkleinsten Abweichungen sehr merkliche Veränderungen des Reliefs nach sich ziehen können. Es können ganz ausserordentlich verwickelte geometrische Gestalten durch dieses Mittel zu einer klaren körperlichen Anschauung gebracht werden. Da übrigens dergleichen Zeichnungen überall käuflich zu haben sind, so gebe ich hier keine Beispiele derselben. Die bisherigen Versuche dergleichen lithographirte Figuren auch zu schattiren, sind ziemlich misslungen, weil die Abstufungen des Schattens in den beiden entsprechenden Figuren nicht gleichmässig genug gemacht werden können. Der Hilfsapparat von Rood zur Construction solcher Zeichnungen ist schon oben S. 605 erwähnt worden.

Weit vollkommener ist die Wirkung der stereoskopischen Photographien, die zuerst von Professor Moser in Königsberg gemacht wurden, deren Anfertigung schon einen ausgedehnten Industriezweig bildet und in denen wir Landschaften und Gebäude aller Theile der Erde, Statuen, Thiere, Blumen u. s. w. dargestellt finden. Dieselben wurden früher meist so gemacht, dass man mit derselben *Camera obscura* nach einander Ansichten des Objects von zwei verschiedenen Punkten aufnahm. Das hatte aber den Nachtheil, dass bei heller Sonnenbeleuchtung die Schlagschatten während der Zeit zwischen der ersten und zweiten Aufnahme ihren Ort wechselten und dann einen falschen Effect in dem Bilde machten. Diese Schatten erscheinen dann mitunter wie körperliche in der Luft befindliche dunkle Schirme. Ich fand einen solchen Effect an einem Bilde von Paris, wo durch die Stellung des Zeigers an der Uhr eines Kirchthurms constatirt werden konnte, dass nur fünf Minuten zwischen der Aufnahme der beiden Bilder vergangen waren. Dazu kommt die Schwierigkeit der zwei zu präparirenden lichtempfindlichen Platten u. s. w. In neuerer Zeit werden deshalb nach D. Brewster's [2] Vorschlag vielfach Instrumente mit zwei Objectivgläsern benutzt, welche auf zwei verschiedenen Abschnitten derselben Platte gleich die beiden Bilder geben. Die Centra der beiden Objectivlinsen haben den Abstand der menschlichen Augen von einander, oder auch wohl einen etwas grösseren 70 bis 75 Millimeter und die *Camera obscura* selbst bildet also gleichsam ein umgekehrtes Stereoskop. Diese Instrumente sind sehr zweckmässig zur Aufnahme naher Gegenstände und sie geben unmittelbar die Ansicht, wie sie ein am Orte des Instruments ruhig weilender Beobachter von dem Objecte gehabt haben würde. Sie haben namentlich den Vortheil, dass man bei scharfer Sonnenbeleuchtung durch instantane Exposition der Platte gute Bilder von beweglichen Objecten, Menschen, Thieren, Schiffen, ja selbst prachtvolle Bilder der Wellen einer bewegten Wasseroberfläche erzielen kann. Aber sie genügen eigentlich nicht für Landschaften mit weit entfernten Objecten, weil die Distanz der Gesichtspunkte zu klein ist, um in diesen hinreichend grosse Unterschiede zu erhalten, und die ferneren Theile der Landschaft deshalb gewöhnlich ganz flach aussehen [3]. Für diese ist es besser eine Art telestereoskopischer Wirkung zu erzielen, dadurch dass man zwei Aufnahmen von zwei entfernten Punkten macht. So habe ich zum Beispiel unter den sehr vollendeten photographischen Landschaften von Braun in Dornach Abbildungen des Wetterhorn von je zwei verschiedenen

---

[1] Herr Hessemer hat sehr gute der Art herausgegeben und die Regeln der Construction besprochen in Dingler's polytechn. Journal. LXXXIX, 111—121.

[2] *Phil. Mag.* (4) III, 26—30; 1852. *Rep. of Brit. Assoc.* 1849, 2, p. 5.

[3] Ueber die Wahl des Winkels Claudet im *Cosmos*, IV, 65—67, 147. — Sutton im *Cosmos*, IX, 313—319.

Punkten von Grindelwald aus gefunden, zwei desselben Berges von zwei verschiedenen Punkten der Bachalp aus, ebenso der Jungfrau von Mürren aus, welche eine ausgezeichnete schöne Modellirung der Bergform geben, wenn man die ursprünglichen Bilderpaare aus einander schneidet und je zwei aus verschiedenen Paaren combinirt, die also grösserer Distanz der Gesichtspunkte entsprechen, als wenn man die zusammengehörigen combinirt. Im letzteren Falle erkennt man die körperliche Form der Berge ebenso wenig, wie ein stillsitzender Beobachter; im ersteren erkennt man sie besser, ähnlich einem Beobachter, der hin- und hergeht und die nach einander entstehenden Ansichten des Berges vergleicht.

Stereoskopische Abbildungen mikroskopischer Gegenstände von sehr schöner Wirkung sind von Babo [1] angefertigt worden. Bei der Aufnahme wurde die Neigung des Objecttischs gegen die Axe des Mikroskops für die beiden Bilder verschieden gemacht und so die stereoskopische Parallaxe gewonnen.

Bewegliche Bilder hat Herr J. G. Halske verfertigt. Zuerst machte er in einem Doppelbilde, einen abgestumpften Kegel darstellend, die mittleren kleinen Kreise in einer horizontalen Linie verschiebbar. Am hübschesten war aber die Erscheinung zu sehen auf einer schwarzen horizontalen kreisförmigen Scheibe von etwa drei Zoll Durchmesser, die um ihre Axe sich sehr leicht drehte und, einmal angestossen, ziemlich lange in Bewegung blieb. Auf dieselbe wurde eine kleinere weisse Kreisscheibe (Oblate) gelegt und die Scheibe mit einem Auge durch ein passend befestigtes total reflectirendes rechtwinkeliges Prisma betrachtet, mit dem andern frei. Wenn sich der kleinere Kreis bei der Drehung rechts vom Mittelpunkt befand, sah ihn das freie Auge rechts, das durch das Prisma schauende Auge aber wegen der Spiegelung links vom Mittelpunkte, und so wurde die stereoskopische Parallaxe hergestellt. Der kleine Kreis schien durch die Fläche des grossen hindurch wechselnd bald aufzusteigen, bald hinabzusinken.

Geschichte. Die älteren Ansichten über die Tiefenwahrnehmung schlossen sich zunächst an die Frage über die scheinbar verschiedene Grösse des Mondes. Ptolemaeus (150 n. Chr.) sagt schon, dass die Seele von der Grösse der Gegenstände nach einer vorgefassten Schätzung ihrer Entfernung urtheilt; diese scheine grösser, wenn viele Gegenstände zwischen dem Auge und der betrachteten Sache liegen, wie es der Fall ist, wenn die Himmelskörper nahe beim Horizont sind [2]. An einer andern Stelle freilich schreibt er die Vergrösserung der Brechung der Strahlen durch die Dünste zu [3]. Alhazen [4] (im 10. Jahrh.) widerlegt die letztere Ansicht und kehrt zur ersteren zurück. Ihm pflichtet Roger Baco bei, während Porta [5] es bestreitet. Vitellio [6] (1270) schliesst sich Alhazen an und macht auch darauf aufmerksam, dass überhaupt das Himmelsgewölbe am Horizont scheinbar entfernter sei, als im Zenith. Kepler [7], dem sich Cartesius [8] im Wesentlichen anschloss, sagt über die Beurtheilung der Entfernung schon, die Entfernung der beiden Augen sei die Grundlinie, deren man sich zur Messung der Entfernung der gesehenen Objecte bediene. Und weil ein Auge von beiden Augen diese Art zu messen lerne, so könne auch bei verhältnissmässig kleinen Entfernungen die Breite des Sterns im Auge als Grundlinie dienen. Dann bemerkt er weiter, dass man auch mit einem Auge die verschiedenen Grade des Lichts zu schätzen und die Grösse mit der Entfernung der Sache durch die Uebung zu vergleichen wisse, indem man durch die Erfahrung lerne, wie weit man die Hand darnach auszustrecken und dahin zu gehen habe. Er kannte also schon die Hauptmomente dieser Beurtheilung, abgesehen von der Verschiedenheit der Bilder.

Gassendi [9] konnte indessen in Bezug auf den Mond wieder behaupten, er erscheine grösser in der Nähe des Horizonts, weil dann wegen des schwächeren Lichts die Pupille

---

[1] Bericht der Freiburger Ges. II, 312—314.

[2] Montucla *Hist. des Mathém.* Vol. I, p. 309. — Rogeri Baconis Perspect., p. 118. — Priestley Geschichte der Optik, übersetzt von Klügel, p. 11—12. — Gregory Geometria. Pars univers., p. 141. — Malebranche *Recherche de la verité.* P. I. — Huygens in Smith *Opticks.* Art. 586. — Logan in *Phil. Trans.* XXXIX, 404.

[3] Almagest L. III, c. 3. Auch Strabo in Geogr. I, 3.

[4] Alhazen L. VII, p. 53—54.

[5] De refractione, p. 24, 128.

[6] Optica, Editio Risneri, p. 412. Basel 1572.

[7] Paralipomena, p. 62—66. 1604.

[8] Dioptr. p. 68. De homine, p. 66—71.

[9] Gassendi Opera. Vol. II, p. 325.

sich erweitere. HOBBES [1] ging auf die Erklärungen der Alten zurück und bestimmte die scheinbare Gestalt des Himmelsgewölbes als ein Stück einer Kugelfläche. Pater GOUYE [2], MOLYNEUX [3] und SAMUEL DUNN [4] bemerkten dagegen, dass es nicht nöthig sei, Gegenstände zwischen dem Auge und dem Monde zu haben, und dass doch die Täuschung nicht (wenigstens nicht immer) aufhöre. DESAGULIERS [5] arrangirte Versuche, wobei die Zuschauer zu falschen Schlüssen über die Entfernung inducirt wurden und demgemäss auch die Grösse falsch beurtheilten. BERKELEY [6] hob das trübe Ansehen und die Lichtschwäche des Mondes am Horizonte hervor, Umstände, die jedenfalls einen sehr deutlichen Einfluss haben. Auch SMITH [7] untersuchte den Einfluss der scheinbaren Gestalt des Himmelsgewölbes; er stellte eine Reihe Schätzungen an über scheinbar gleiche Distanzen, die bald dem Zenith, bald dem Horizont näher gelegen waren, und fand, dass die Entfernung des Horizonts scheinbar drei bis vier Mal grösser sei, als die des Zeniths. LAMBERT [8] verglich den Querschnitt des Himmelsgewölbes mit einer Muschellinie. Auch die Gestalt und Breite des Regenbogens wird dadurch verändert, er erscheint flach elliptisch, seine Mitte schmaler als die Fusspunkte; ebenso werden Sonnenhöfe, Sterndistanzen scheinbar verändert. SMITH hat auch folgenden hübschen Versuch angegeben. Wenn man in den Brennpunkt einer Convexlinse eine kleine kreisrunde Oblate stellt, so erscheint deren Bild, durch die Linse gesehen, immer unter demselben Gesichtswinkel, wie weit auch der Beobachter sich entferne, so lange seine Ränder überhaupt noch durch die Linse sichtbar sind. Scheinbar wächst aber die Grösse des Bildes ausserordentlich, wenn sich der Beobachter entfernt, weil wir es nicht in unendlicher Entfernung, sondern noch hinter der Linse befindlich denken.

SMITH, der gegen BERKELEY's Einmischung der Luftperspective polemisirte, muss indessen doch zugeben, dass der Mond am Horizont bald grösser, bald kleiner aussieht. Auch EULER [9] schliesst sich BERKELEY an.

Den Einfluss, den die scheinbare Entfernung auf die Schätzung der absoluten Grösse hat, hoben auch MALEBRANCHE und BOUGUER [10] gegen VARIGNON [11] hervor. Ueber die Mittel, die Entfernung zu beurtheilen, sprachen sich DE LA HIRE [12] und PORTERFIELD [13] ebenfalls den bisher erwähnten Ansichten entsprechend aus.

Umkehrung des Reliefs ist auch schon früh bemerkt worden und zwar zuerst bei der Betrachtung durch umkehrende Mikroskope oder Teleskope von JABLOT [14] und G. P. GMELIN [15], und wurde von RITTENHOUSE [16] auf verkehrte Beleuchtung geschoben. MUNCKE [17] hob dagegen hervor, dass sie auch bei der Betrachtung durch eine einfache Loupe eintreten kann. ABAT fügte die hübsche Beobachtung hinzu, dass, wenn man eine mit Wasser halb gefüllte Glasflasche im umgekehrten Bilde eines Hohlspiegels betrachtet, der leere Theil gefüllt, der gefüllte leer erscheint, weil man die Flüssigkeit sich immer unterhalb der Grenzfläche denkt. Die neueren Ermittelungen und Ansichten über die Umkehrung des Reliefs sind oben schon angeführt worden.

Dass die Bilder, welche beide Augen von einem körperlichen Gegenstande erhalten müssten, etwas verschieden seien, hatten EUKLID, GALEN, PORTA, AGUILONIUS [18] schon gewusst und Schwierigkeiten darin gefunden. LEONARDO DA VINCI [19] hob schon hervor, dass bei dem zweiäugigen Sehen von Körpern dadurch ein Unterschied gesetzt werde, der durch kein Gemälde nachgeahmt werden könnte. SMITH [20] blickte mit parallelen Gesichtslinien nach den

---

[1] ROBIN's *tracts.* Vol. II, p. 241—244.
[2] *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1700, p. 11.
[3] *Philos. Transact.* Vol. I, p. 221.
[4] *Philos. Transact.* Vol. LII, p. 462.
[5] *Philos. Transact.* Vol. VIII, p. 130.
[6] *Essay toward a new theory of vision.* Dublin 1709. p. 30. — ROBIN *mathemat. tracts.* II, 242.
[7] Optik, deutsche Ausg. S. 418.
[8] Beiträge. I, §. 60—78.
[9] Briefe an eine deutsche Prinzessin. S. 317.
[10] *Mém. de l'Académie.* 1755. p. 99 u. 156.
[11] Ebenda. 1717.
[12] *Mém. de Paris.* 1694.
[13] *Treatise on the eye.* 1759.
[14] *Description de plusieurs nouveaux microscopes.* 1712.
[15] *Philos. Transact.* 1747.
[16] *Transact. of the American Philos. Society.* 1786. II.
[17] GEHLER's physik. Wörterbuch, neu bearbeitet. Leipzig 1828. IV, 1455.
[18] S. BREWSTER *the stereoscope, its history, theory and construction.* London 1856.
[19] *Trattato della pittura.*
[20] *System of Optics.* II, 388 u. 526.

beiden Schenkeln eines Cirkels, die bis zur Augendistanz geöffnet waren, und bemerkte plötzlich, wie sich beide Schenkel zu einem vereinigten, der in weite Entfernung hinauszureichen schien. Es war dies eine stereoskopische Wahrnehmung. Aehnliche Wahrnehmungen an Linealen und Fäden sind von Wells [1] gemacht worden.

Wie viel die Verschiedenheit der Bilder beider Augen zur Unterscheidung der Tiefendimensionen beiträgt, wurde aber erst durch Wheatstone's geistreiche Erfindung des Stereoskops nachgewiesen. Die erste Nachricht davon wurde 1833 veröffentlicht [2], die ausführliche Beschreibung der Erscheinungen und ihre Theorie 1838 [3]. Nach D. Brewster's Angaben [4] hätte ein Mathematiker J. Elliott in Edinburg es ebenfalls im Jahre 1834 erfunden und 1839 veröffentlicht. Ein Dritter, der die Erfindung in Anspruch nimmt, ist Herr G. Maynard [5]. Herr Wheatstone kann jedenfalls den Vorrang der Priorität behaupten, und ist auch sein Aufsatz von 1838, der die Beschreibung des Spiegelstereoskops enthält, voll von einer reichen Menge von Versuchen und Beobachtungen, durch welche alle wesentlichen hierher gehörigen Verhältnisse deutlich dargelegt und erwiesen werden. Später wurde im Jahre 1859 von Dr. A. Brown [6] im Museum Wicar in Lille eine Doppelzeichnung von Jacopo Chimenti (geboren 1554, gestorben 1640) gefunden, einen Mann darstellend, der auf einem Schemel sitzt und in der einen Hand einen Cirkel, in der andern einen Lothfaden hält. Die beiden Zeichnungen, stereoskopisch vereinigt, geben eine Art von Relief. D. Brewster glaubte annehmen zu dürfen, dass sie von Chimenti zur Prüfung der Theorie von Porta, die 1593 veröffentlicht war, ausgeführt seien. Seitdem sind photographische Abbildungen dieser Zeichnungen in den Handel gekommen. Die beiden Bilder des Mannes sind in der That von verschiedenen Gesichtspunkten aus aufgenommen; ich muss indessen gestehen, dass ich es für unwahrscheinlich halte, dass der Zeichner sie für einen stereoskopischen Versuch bestimmt habe; denn gerade der Sessel, der Cirkel und der Faden, welche leicht richtig zu construiren gewesen wären, sind als Nebendinge behandelt und so unregelmässig und verschiedenartig gezeichnet, dass sie sich nicht vereinigen lassen. Und hätte der Zeichner die Theorie prüfen wollen, so müsste man eher erwarten, dass die leicht zu zeichnenden Dinge richtig, die schwer zu zeichnenden, wie die Gestalt des Menschen, ungenau gemacht worden wären. Es scheint mir wahrscheinlicher, dass der Zeichner, mit der ersten Figur nicht ganz zufrieden, sie noch einmal von einem etwas anderen Standpunkte aus gezeichnet und zwar zufällig auf dasselbe Blatt.

Die jetzt gewöhnliche Form des Linsenstereoskops wurde von D. Brewster 1843 veröffentlicht. Die Uebersicht der weiteren Erfindungen gibt die nachfolgende Uebersicht der Literatur; die Geschichte der Theorie dieser Erscheinungen wird bei den nächsten Paragraphen folgen. Die Untersuchungen über die Fehler der reinen binocularen Localisation sind erst in den letzten Jahren von Recklinghausen [7], Hering [8], J. Towne und mir selbst [9] in Angriff genommen worden, bedürfen aber noch vielfach erneuerter Wiederholung und Erweiterung von andern Beobachtern.

---

1. Tiefenwahrnehmung ohne Rücksicht auf die Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder.

150. Claudius Ptolemaeus. Syntaxis mathematica (Almagest). Lib. III, Cap. 3 und Optica.
1038. Alhazen. Opticae thesaurus. Lib. VII, p. 53—54. Edit. Risneri. Basil. 1572.
1214—94. Roger Baco. Opus majus. London 1733. Perspective. p. 118.
1271. Vitellio. Optica. p. 412. Edit. Risneri. Basil. 1572.
1583. B. Porta. De refractione. p. 24, 128.
1588—1679. Hobbes in Robin's *Mathematical tracts.* London 1761. Vol. II, p. 241—244.
1604. Kepler. Paralipomena. p. 62—66.
1644. Descartes. Dioptrice. Amstelodami. p. 68. De homine. p. 66—71.
1658. P. Gassendi. Opera omnia. Lugd. 1658. Vol. II, p. 395.
1667. J. Gregory. Geometriae pars universalis. Venetiae. p. 141.

---

[1] *Essay upon single vision with two eyes.* 1792. Zweite Aufl. 1818.
[2] In H. Mayo's *Outlines of human physiology.* p. 288.
[3] *Philosophical Transactions.* 1838. P. II, S. 371—394.
[4] *Liverpool and Manchester Photographic Journal.* 1857, January 1, p. 4—7. — January 15. p. 21—23.
[5] Toronto *Royal Standard.* 1836. Toronto *Times.* 1857, October 8.
[6] *Photographic Journal.* 1860, May 15. — *Encyclop. Britann.* Artikel: Stereoskope.
[7] Netzhautfunctionen im Archiv für Ophthalmologie. V, 147—173.
[8] Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1864. 4. und 5. Heft.
[9] Im Archiv für Ophthalmologie. X, 1, S. 27—40.

1674. Malebranche. *Recherche de la verité.* Paris. P. I.
1687. Molyneux. *Why celestial objects appear greatest near the horizon. Phil. Trans.* 1681. Vol. I, p. 221.
1694. de la Hire. *Sur différents accidents de la vue. Anc. Mémoires de Paris.* IX.
1700. Th. Gouye. *Mém. de Paris.* 1700. p. 11.
1709. Berkeley. *Essay toward a new theory of vision.* Dublin. p. 30. — Auch in Robin's *mathematical tracts.* II, 242. London 1761.
1712. Jablot. *Description de plusieurs nouveaux microscopes.* (Umkehrung des Reliefs.)
1717. Varignon. *Lignes suivant lesquelles des arbres doivent être plantés pour être vues deux à deux aux extrémités de chaque ordonnée à ces lignes sous des angles de sinus données. Mém. de Paris.* 1717.
1728. R. Smith. Optik. Deutsche Ausgabe. S. 418. Ebenda Huygens in Art. 586.
1736. J. Logan. *Some thoughts on the sun and the moon, when near the horizon appearing larger than when near the zenith. Phil. Trans.* 1736.
— J. T. Desaguliers. *Attempt to explain the phenomenon of the horizontal moon appearing larger than when elevated, supported by an experiment. Phil. Trans.* 1736. LII, p. 462.
1745. P. F. Gmelin. De fallaci visione per microscopia composita notata. *Phil. Trans.* 1745.
1755. P. Bouguer. *Sur la grandeur apparente des objets. Mém. de Paris.* 1755.
1758. J. E. Montucla. *Histoire des mathématiques.* Paris 1758. Vol. I, p. 309.
1759. W. Porterfield. *A treatise on the eye.* Edinb. 2 Vol.
1762. Sam. Dunn. *An attempt to assign the cause, why the sun and moon appear to the naked eye larger, when they are near the horizon. Phil. Trans.* 1762. Vol. VIII. p. 130.
1765. J. H. Lambert. Beiträge zum Gebrauch der Mathematik und deren Anwendung. Berlin 1765—72. Bd. I, §. 60—78.
1768. L. Euler. *Lettres à une Princesse d'Allemagne.* Petersb. 1768—72. Deutsch von F. Kries. Leipzig 1792—94. S. 317.
1772. Priestley. Geschichte der Optik, deutsch von Klügel. Leipzig 1776. II, 491—511.
1786. D. Rittenhouse. *Explanation of an optical deception. Transact. American Philos. Society.* 1786. II. — *Edinb. Journal of science.* VII, 99.
1828. Muncke. Art: Gesicht in Gehler's physik. Wörterbuch; neu bearbeitet. Leipzig 1828. IV, 1455.
1847. D. Brewster. *On the conversion of relief by inverted vision. Edinb. Phil. Trans.* XV, 657; *Phil. Magaz.* XXX, 432; *Athenaeum.* 1847, Nr. 1029, p. 773.
1848. Waller. *Sur un cas, où la vue altérée faisait voir les objets plus petits que nature. Inst.* XVII, Nr. 787, p. 39.
1850. De Haldat. *Mémoire sur quelques illusions d'optique et particulièrement sur la modification des images oculaires. C. R.* XXXII, 357.
1853. H. Denzler. Ueber eine Sinnestäuschung psychologischen Ursprungs. Mitth. d. naturforsch. Ges. in Zürich. III, 216—218.
1855. J. J. Oppel. Ueber ein Anaglyptoskop. (Vorrichtung, vertiefte Formen erhaben zu sehen.) Jahresber. d. Frankfurter Vereins. 1854—55, p. 55—57; Pogg. Ann. XCIX, 466—469.
1856. A. Weber. Ueber die scheinbare Umkehrung des Erhabenen und Vertieften. Arch. für Ophthalm. II, 1, p. 141—146.
1858. H. Schroeder. Ueber eine optische Inversion bei Betrachtung verkehrter, durch optische Vorrichtung entworfener physischer Bilder. Pogg. Ann. CV, 298—311.
1859. W. Wundt. Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Henle und Pfeufer Zeitschr. (3) VII, 279—317, über den Einfluss der Accommodation auf die räumliche Tiefenwahrnehmung.
— L. Panum. Die scheinbare Grösse der gesehenen Objecte. Archiv für Ophthalmol. V, 1, p. 1—36.
1860. D. Brewster. *On some optical illusions connected with the inversion of perspective. Athenaeum,* 1860, 2, p. 24; *Rep. of Brit. Assoc.* 1860, 2, p. 7—8.
— Sinsteden. Ueber ein neues pseudoskopisches Bewegungsphänomenen. Pogg. Ann. CXI, 336—339. *Cosmos.* XVIII, 290—292.
— Mohr. Ueber pseudoskopische Wahrnehmungen. Pogg. Ann. CXI, 638—642.
1862. E. Emerson. *On the perception of relief. Silliman J.* (2) XXXIV, 312—314; *Phil. Mag.* (4) XXV, 125—130.

1862. R. T. LEWIS. *On the changes in the apparent size of the moon. Phil. Mag.* (4) XXIII, 380—382.
— T. ZENO über dasselbe. *Phil. Mag.* (4) XXIV, 390—392.
— G. SCHWEIZER. Ueber eine merkwürdige optische Täuschung, die bei der Betrachtung des Mondes durch Fernröhre vorkommen kann. *Bull. de Moscou.* 1862, 1, p. 336—332. Astronom. Nachrichten. LVIII, 182—192.

2. Stereoskopie und binoculare Tiefenwahrnehmungen.

300 v. Chr. EUKLIDES. Optice er Katoptrice.
1583. B. PORTA. De refractione.
1613. AGUILONIUS. Opticorum Libri VI. Antwerp.
1651. LEONARDO DA VINCI (geboren 1452, gest. 1519). *Trattato della pittura.* Rom 1651.
1728. R. SMITH. *Optics.* II, 388 und 526.
1792. W. C. WELLS. *Essay upon single vision with two eyes.* London 1792. Neue Auflage. London 1818.
1811. Derselbe. *Observations and experiments on vision. Phil. Trans.* 1811.
1833. A. MAYO. *Outlines of human physiology.* p. 288.
1838. C. WHEATSTONE. *Contributions to the physiology of vision.* Part I. *On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision. Phil. Trans.* 1838. P. II, p. 371—394.
1841. E. BRÜCKE. Ueber die stereoskopischen Erscheinungen. MÜLLER's Archiv. 1841, p. 459.
1842. TOURTUAL. Die Dimension der Tiefe. Münster.
1844. D. BREWSTER. *Law of visible position in single and binocular vision and on the representation of solid figures by the union of dissimilar plane pictures in the retina. Edinb. Phil. Trans.* XV. *Phil. Magaz.* XXIV, 356—439.
1850. Derselbe. *Notice of a chromatic stereoscope. Edinb. J.* XLVIII, 150. *Institut.* Nr. 850, p. 128. *Phil. Mag.* (4) III, 31. *Silliman J.* (2) XV, 289—290.
— DUBOSCQ. *Description du stéréoscope de M.* BREWSTER *construit par lui. C. R.* XXXI, 895; *Bull. de la Soc. d'encouragement.* 1851, p. 45. DINGLER polyt. Journal. CXX, 159. *Athenaeum.* 1861, p. 1350.
— H. W. DOVE. Ueber das Binocularsehen prismatischer Farben und eine neue stereoskopische Methode. Pogg. Ann. LXXX, 446. Berl. Monatsber. 1850, p. 152. *Arch. de Genève.* XIX, 219.
— Derselbe. Beschreibung mehrerer Prismenstereoskope und eines einfachen Spiegelstereoskops. Pogg. Ann. LXXXIII, 183. Berl. Monatsber. 1851, p. 246. *Phil. Mag.* (4) II, 29. *Inst.* Nr. 937, p. 404.
— Derselbe. Ueber eine bei dem Doppeltsehen einer geraden Linie wahrgenommene Erscheinung. Berl. Monatsber. 1850, p. 363. *Inst.* Nr. 907, p. 128.
1852. J. DUBOSCQ. *Nouveaux stéréoscopes. Cosmos.* I, 97—104; 703—705.
— D. BREWSTER. *Description of several new and simple stereoscopes for exhibiting, as solids, one or more representations of them on a plane. Phil. Mag.* (4) III, 16—26. *Trans. of Scott. Soc. of arts.* 1849. *Rep. of Brit. Assoc.* 1849, 2, p. 5. *Arch. d. sc. phys.* XIX, 200—204. Dingler polyt. J. CXXIV, 109—112. *Silliman J.* (2) XV, 140—142; 288—289.
— Derselbe. *Account of a binocular camera and of a method of obtaining drawings of full length and colossal statues. Phil. Mag.* (4) III, 26—30. *Trans. of Scott. Soc. of arts.* 1849. *Rep. of Brit. Assoc.* 1849, 2, p. 5.
— Derselbe. *Sur la vision binoculaire et le stéréoscope. Cosmos.* I, 422—425. *North British Review.* 1852, May.
— E. WILDE. Ueber die Anwendung der Camera lucida zu einem Stereoskope. Pogg. Ann. LXXXV, 63—67.
— C. WHEATSTONE. *Contributions to the physiology of vision.* P. II. *On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision. Phil. Mag.* (4) III, 149—152; 504—523. *Inst.* 1852, p. 179—180. *Arch. d. sc. phys.* XIX, 196—200.
— H. MEYER. Ueber die Schätzung der Grösse und der Entfernung der Gesichtsobjecte aus der Convergenz der Augenaxen. Pogg. Ann. LXXXV, 198—207. *Arch. d. sc. phys.* XX, 137—138. *Cosmos.* I, p. 47.
— DOVE in Pogg. Ann. LXXXV, p. 407—408.
1853. W. ROLLMANN. Notiz zur Stereoskopie. Pogg. Ann. LXXXIX, 350—351.
— Derselbe. Zwei neue stereoskopische Methoden. Pogg. Ann. XC, 186—187. Zeitschr. für Naturwiss. III, 97—100. Fechner Centralblatt. 1855, p. 980—981.

1853. W. Hardie. *Description of a new pseudoscope. Phil. Mag.* (4) V, 442—446.
— C. Clarke. *Perfectionnements apportés au stéréoscope. Cosmos.* III, 123.
— Kilburn. *Stéréoscope-écrin. Cosmos.* III, 770.
1854. J. Duboscq. *Stéréoscope cosmoramique ou optique stéréoscopique. Cosmos.* IV, 33—35.
— Claudet. *Théorie des images stéréoscopiques. Cosmos.* IV, 65—67.
— Derselbe. *Angle stéréoscopique. Cosmos.* IV, 147.
— G. Knight. *On a stereoscopic cosmoramic lens. Athenaeum.* 1854, p. 1241—1242. *Cosmos.* V, 240. *Rep. of Brit. Assoc.* 1854, 2, p. 70.
— Moigno. *Invention du stéréoscope par réfraction. Cosmos.* V, 241.
— Smee. *Sur la perspective binoculaire. Cosmos.* V, 512—513.
1855. J. Czermak. Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes. Wiener Ber. XII, 322—366; XV, 425—466; XVII, 563—576.
— F. Burckhardt. Ueber Binocularsehen. Verhandl. d. naturf. Ges. in Basel. I, 123—154.
— Soret. *Sur un phénomène de vision binoculaire. Biblioth. univ. de Genève.* Octobre 1855.
1856. W. B. Rogers. *Observations on binocular vision. Silliman J.* (2) XXI, 80—95; 173—189; 439. *Edinb. J.* (2) III, 210—217.
— D. Brewster on Mr. Roger's *theory of binocular vision. Proc. of Edinb. R. Soc.* III, 356—358.
— J. J. Oppel. Notizen über Stereoskopie, insbesondere über eine einfache vergrössernde Modification des Stereoskops ohne Spiegel und Gläser. Jahresber. d. Frankfurt. Vereins. 1855—1856, p. 37—56.
— Faye. *Sur un nouveau système de stéréoscope. C. R.* XLIII, 673—674. Pogg. Ann. XCIX, 641—642. *Cosmos.* IX, 374—375. *Inst.* 1856, p. 349. *Arch. de sc. phys.* XXXIII, 221. Dingler polyt. J. CXLIII, 316.
— Zinelli. Neue Methode, die Bilder im Relief zu sehen. Zeitschr. für Mathematik. 1856, 1, p. 320—321. Horn photogr. J. 1856, Nr. 10. Dingler polyt. J. CXL, 315.
— H. Goldschmidt. *Sur la vision stéréoscopique. Cosmos.* IX, 657.
— H. Meyer. Beitrag zur Lehre von der Schätzung der Entfernung aus der Convergenz der Augenaxen. Archiv f. Ophthalmologie. II, 2, p. 92—94.
— J. M. Hessemer. Ueber die Anfertigung stereoskopischer Bilder. Dingler polyt. J. LXXXIX, 111—121.
— Lugeol. *Stereoscopic experiment. Silliman J.* (2) XXII, 104.
— Sutton. *Sur la théorie du stéréoscope. Cosmos.* IX, 313—319.
— D. Brewster. *The stereoscope, its history, theory and construction.* London 1856.
— A. Claudet. *On various phenomena of refraction through semilenses or prisms, producing anomalies in the illusion of stereoscopic images. Proc. of R. Soc.* VIII, 104—110. *Athenaeum.* 1856, p. 1029. *Cosmos.* XI, 283—285. *Inst.* 1856, p. 346. *Phil. Mag.* (4) XIII, 71—75. *Rep. of Brit. Assoc.* 1856, 2, p. 9—10.
— D. Brewster. *Réclamation de priorité. Cosmos.* VIII, 549—552.
— Wheatstone. *Réponse aux assertions de Sir* D. Brewster. *Cosmos.* VIII, 625—628.
1857. Dove. Ueber die Unterschiede monocularer und binocularer Pseudoskopie. Berl. Monatsber. 1857, p. 221—226. Pogg. Ann. CI, 302—308.
— Dove. Darstellung von Körpern durch Betrachtung einer Projection derselben vermittels eines Prismenstereoskops. Berl. Monatsber. 1857, p. 291.
— A. Cima. *Sopra un nuovo fenomeno di stereoscopia. Cimento.* VI, 185—192. *C. R.* XLV, 664. *Phil. Mag.* (4) XIV, 480. Pogg. Ann. CII, 319. *Inst.* 1857, p. 364—365. *Cosmos.* XI, 353—354.
— J. G. Halske. Stereoskop mit beweglichen Bildern. Pogg. Ann. C, 657—658.
— J. Elliot. *The telescoping sterescope. Phil. Mag.* (4) XIII, 78. *Silliman J.* (2) XXIII, 292.
— Derselbe. *On two new forms of the stereoscope, intended for the purpose of uniting large binocular pictures. Phil. Mag.* (4) XIII, 104—108; 218—219.
— H. Helmholtz. Das Telestereoskop. Pogg. Ann. CI, 494—496; CII, 167—175. Verhandl. d. naturhist. Vereins d. Rheinl. 1857. *Ann. de chimie.* (3) LII, 118—124. *Phil. Mag.* (4) XV, 19—24. *Inst.* 1858, p. 63—64. *Silliman J.* (2) XXV, 297—298. Dingler polyt. J. CXLIV, 268—270. Polytechn. Centralbl. 1857, p. 1449—1450; 1858, p. 180—186. *Cimento.* VI, 239—240. *Cosmos.* XI, 352—353.
— J. Duboscq. *Note sur une nouvelle disposition de stéréoscope à prismes réfringents, à angle variable et lentilles mobiles. C. R.* XLIV, 148—150. *Cosmos.* X, 91—92.

1857. W. Crookes. *Théorie des images stéréoscopiques. Cosmos.* X, 461—462.
— D. Brewster and C. Wheatstone im *Liverpool and Manchester Photographic J.* 1857, January 1, p. 4—7; January 15, p. 21—23. (Prioritätsstreit.)
1858. Dove. Ueber den Einfluss des Binocularsehens bei Beurtheilung der Entfernung durch Spiegelung und Brechung gesehener Gegenstände. Berl. Monatsber. 1858, p. 312—315. Pogg. Ann. CIV, 325—329. *Inst.* 1858, p. 282—283.
— W. Hardie. *On the telestereoscope. Phil. Mag.* (4) XV, 156—157. (Prioritätsreclamation.)
— Smith and Beck. *Improvements to the stereoscope. Athenaeum.* 1858, II, 269—270.
— A. Boblin. *Expérience d'optique permettant d'obtenir d'une seule épreuve photographique la sensation d'un corps en relief. Bull. de Brux.* (2) V, 304—306. *Inst.* 1858, p. 431—432. *C. R.* XLVII, 444.
— Claudet. *On the stereomonoscope. Phil. Mag.* (4) XVI, 462—463. *Proc. of Roy. Soc.* IX, 194—196. Dingler polyt. J. CLI, 72—73. *Cosmos.* XII, 493.
— J. C. D'Almeida. *Nouvel appareil stéréoscopique. C. R.* XLVII, 61—63.
1859. F. v. Recklingnausen. Netzhautfunctionen. Archiv für Ophthalmol. V, 2, 127—179. Pogg. Ann. CX, 65—92.
— E. Brücke. Eine Dissectionsbrille. Arch. für Ophthalm. V, 2, p. 181—183.
— H. W. Dove. Stereoskopische Darstellung eines durch einen Doppelspath binocular betrachteten Typendrucks. Berl. Monatsber. 1859, p. 278—280. Pogg. Ann. CVI, 655—657. *Phil. Mag.* (4) XVII, 414—415.
— Derselbe. Anwendung des Stereoskops, um einen Druck von seinem Nachdruck, überhaupt ein Original von seiner Copie zu unterscheiden. Berl. Monatsber. 1859, p. 280—288. Pogg. Ann. CVII, 657—660. *Phil. Mag.* (4) XVII, 415—417. Dingler polyt. J. CLIII, 451—454. Polytechn. Centralbl. 1859, p. 741—744.
— J. Müller. Stereoskopische Mondphotographie. Pogg. Ann. CVII, 660. Ber. d. Freiburger Ges. II, 67. Dingler polyt. J. CLIII, 75.
— W. de la Rue. *Report of the present state of celestial photography in England. Stereoscopic pictures of the moon. Rep. of Bris. Assoc.* 1859, 1, p. 143—145. *Cosmos.* XV, 519—521.
— Derselbe. *Stereoscopic pictures of the larger planets. Rep. of Brit. Assoc.* 1859, 1, p. 148, 149.
— J. J. Oppel. Ueber das Einfachsehen doppelter Bilder bei gekreuzten Augenaxen. Jahresber. d. Frankfurt. Vereins. 1858—59, p. 22—38; p. 64—75.
— Samuel. *On an early form of the lenticular stereoscope constructed for the use of schools. Rep. of Brit. Assoc.* 1858, 2, p. 19.
— H. W. Dove. Optische Studien, Fortsetzung der in der Farbenlehre enthaltenen. Berlin 1859. (Sammlung der bisher citirten Aufsätze.)
— J. Beck. *On producing the idea of distance in the stereoscope. Rep. of Brit. Assoc.* 1858, 2, p. 7.
— E. Douliot. *Sulla percezione de' rilievi nello steroscopio e nella natura. Cimento.* X, 342—352.
1860. P. Volpicelli. *Di uno steroscopio diaframmatico. Cimento.* XII, 181—189.
— J. Beck. Verbesserungen an Stereoskopen. *Lond. J. of arts.* Juni 1860. Dingler polyt. J. CLVII, 277—278.
— H. W. Dove. Ueber die Nicht-Identität der Grösse der durch Prägen und Guss in derselben Form von verschiedenen Metallen erhaltenen Medaillen. Pogg. Ann. CX, 498—499. *Phil. Mag.* (4) XX, 327. Dingler polyt. J. CLVII, 280—281.
— A. Rollet. Physiologische Versuche über binoculares Sehen, angestellt mit Hülfe planparalleler Glasplatten. Wiener Ber. XLII, 488—502.
— E. Brücke. Ueber prismatische Brillen. Wiener med. Wochenschrift. 9. Juni 1860.
— Giraud Teulon eben darüber. *C. R.* L, 382—385.
1861. W. Wundt. Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Vierte Abhandl. Ueber das Sehen mit zwei Augen. Henle und Pfeufer Zeitschr. (3) XII, 145—262. Pogg. Ann. CXVI, 617—628. (Die citirten Aufsätze sind gesammelt erschienen unter dem Titel: W. Wundt Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig und Heidelberg 1862.)
— O. Becker und A. Rollet. Beiträge zur Lehre vom Sehen der dritten Dimension. Wiener Ber. XLIII, 2, p. 667—706.
— H. W. Dove. Ueber Binocularsehen und subjective Farben. Berliner Monatsber. 1861, p. 521—522. Pogg. Ann. CXIV, 163—165.

1861. L. v. Babo. Ueber die stereoskopische Darstellung mikroskopischer Gegenstände. Ber. d. Freiburger Ges. II, 312—314.
— T. du Moncel. *Rapport sur les appareils stéréoscopiques de Mr.* Ph. Benoist. *Bull. de la Soc. d'encour.* 1861, 1, 198—201.
1862. J. Towne. *The stereoscope and stereoscopic results. Guy's Hospital Reports.* 1862 und 1863, p. 103; XI, 144—180.
— E. Hering. Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1861—64. 2. bis 5. Heft.
1864. Knapp. *Exposé des avantages de l'ophthalmoscope binoculaire. Ann. d'oculistique.* 1864.

§. 31. Das binoculare Doppeltsehen.

Wir haben bisher die Erscheinungen des zweiäugigen Sehens betrachtet, insofern sie sinnliche Zeichen für eine bestimmte Lage der gesehenen Raumobjecte sind. Es bleibt noch übrig die subjectiven Erscheinungen, die sich hierbei zeigen, zu untersuchen.

Ich habe oben auseinandergesetzt, wie im monocularen Sehen neben der Anschauung der wirklichen Vertheilung der Objecte nach den drei Dimensionen des Raumes sich, wenn man auf die Art, wie sie gesehen werden, achtet, die Anschauung ihrer Vertheilung in dem flächenhaften Gesichtsfelde ausbildet. Wenn nun mit zwei Augen gesehen wird, so erscheinen die Gegenstände in dem Sehfelde jedes Auges, aber da die Bilder in beiden Sehfeldern, wie wir schon gesehen haben, im Allgemeinen nicht gleich sind, so können sie sich im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde auch nicht absolut decken, sondern es bleiben gewisse Ungleichheiten beider Sehfelder bestehen und werden wahrgenommen. In diesem Kapitel sollen die Erscheinungen betrachtet werden, welche von der Ungleichheit der räumlichen Verhältnisse der Bilder beider Sehfelder herrühren, im nächsten die, welche von der ungleichen Beleuchtung oder Färbung der Sehfelder oder ihrer Theile verursacht werden.

Es ist wohl zu beachten, dass diese Betrachtungsweise des Gesichtsfeldes als solchen, nicht die natürliche und zuerst erworbene Art des Wahrnehmens ist, sondern vielmehr stets erst durch bewusste Reflexion auf die Beschaffenheit unserer Gesichtseindrücke veranlasst wird. Wir betrachten dann nicht mehr die Welt der Objecte an sich, wie sie *ist*, sondern wir beobachten, wie sie uns von unserem dermaligen Standpunkte aus *erscheint*. Es ist dann wesentlich die Erscheinung, die uns interessirt, entweder weil wir sie als Zeichner nachbilden, oder als Physiologen theoretisch untersuchen wollen.

So wie wir nun im zweiäugigen Sehen anfangen das Gesichtsfeld als solches zu untersuchen, bemerken wir, dass die Ordnung der Objecte in den beiden Sehfeldern nicht übereinstimmt. Indem wir zum Beispiel durch das Fenster nach den Bäumen draussen sehen, sind wir im Stande das Laubwerk mit dem linken Auge noch etwas weiter nach rechts hin zu verfolgen, als mit dem rechten. Wir sehen mit jenem Auge am rechten Rande des Fensters noch Theile des Laubwerks, die wir mit dem rechten nicht sehen können, welche für das rechte durch den Rahmen des Fensters verdeckt sind. Wir sehen also den Rahmen des Fensters in den beiden Gesichtsfeldern an zwei verschiedene Theile der Laubmasse angrenzen.

Ebenso verdeckt das Fensterkreuz dem rechten Auge einen andern Theil der Laubwand, als dem linken. Indem wir also der Laubwand mit dem Blicke

folgen, tritt uns zwei Mal das Fensterkreuz an zwei verschiedenen Stellen entgegen, die Laubwand, wenn auch unvollständig verdeckend. Das Fensterkreuz erscheint also in zwei Stellen des Gesichtsfeldes, es erscheint doppelt.

Wenn man dagegen den Blick auf das Fensterkreuz oder die Glasscheiben richtet und ihn entlang wandern lässt über die kleinen Flecken der einen Scheibe, dann über den mittleren verticalen Balken des Kreuzes, dann über die andere Scheibe, so kann es kommen, dass ein Baumstamm, der im Gesichtsfelde des rechten Auges rechts neben und hinter dem verticalen Holze erscheint, für das linke Auge links daneben liegt. Also wird auch das fernere Object in der durchlaufenen Reihenfolge der betrachteten Punkte zwei Mal vorkommen und doppelt erscheinen.

Wir haben im Paragraphen 28 gesehen, dass wir die Reihenfolge der Punkte im Gesichtsfelde nicht blos durch wirkliche Bewegung bestimmen können, sondern sie auch lernen nach der Reihenfolge ihrer neben einander liegenden Netzhautbilder im Auge zu beurtheilen. Wir brauchen also auch nicht den Blick wirklich über das Gesichtsfeld hingehen zu lassen, um die Doppelbilder zu sehen, sondern können dauernd einen Punkt fixiren und doch die verschiedene Anordnung der Objecte in beiden Sehfeldern erkennen. Wenn dasselbe Object entweder auf verschiedenen Seiten des fixirten Punktes erscheint, oder aber die Grösse und Richtung seines Abstandes vom Fixationspunkte in hinreichend auffallender Weise verschieden ist, wird man erkennen, dass das betreffende Object in zwei verschiedene Stellen des Gesichtsfeldes eingeordnet erscheint.

Es seien in *Fig. 201* b_0 und b_1 die beiden Augen, welche den Punkt a fixiren, der ihnen demnach einfach an seinem wahren Orte im Raume erscheint. Der Punkt c, welcher näher als a ist, wird dem Auge b_0 rechts von dem Punkte a im Gesichtsfelde erscheinen müssen, da c rechts von der Gesichtslinie ab_0 liegt. Dem Auge b_1 erscheint aber c links von a zu liegen. Also kommt es im gemeinsamen Gesichtsfelde einmal rechts, einmal links von a vor, erscheint also doppelt und zwar in sogenannten ungleichnamigen Doppelbildern, da das scheinbar rechts liegende Bild von a dem linken Auge, das scheinbar links liegende dem rechten Auge angehört.

Umgekehrt ist es mit dem entfernter liegenden Punkte d. Er erscheint im Gesichtsfelde des rechten Auges b_1 rechts neben a, in dem des linken Auges links neben a, folglich in gleichnamigen Doppelbildern.

Ein etwas anderer Fall ist der in *Fig. 202* dargestellte; b_0 und b_1 sind wieder die Augen, a der gemeinsame Fixationspunkt. Der Punkt c liege ausserhalb des Winkels $b_0 a b_1$, in geringerem Abstande von den Augen als der Fixationspunkt. Dies Mal liegt c allerdings in den Gesichtsfeldern beider Augen nach links von a, weil die Richtungslinien cb_0 und cb_1 beide nach links beziehlich von ab_0 und ab_1 liegen. Aber der Winkel cb_0a ist viel kleiner als der Winkel cb_1a. Im Gesichtsfelde von b_0 ist also c um einen viel kleineren Winkel von a entfernt, als im Gesichtsfelde des andern Auges. Ist diese Differenz merklich genug, so erscheint das Bild wieder an zwei verschiedenen Orten des gemeinsamen Gesichtsfeldes, also doppelt. Die Doppelbilder sind aber in diesem Falle nicht so deutlich, als wenn sie auf verschiedenen Seiten des

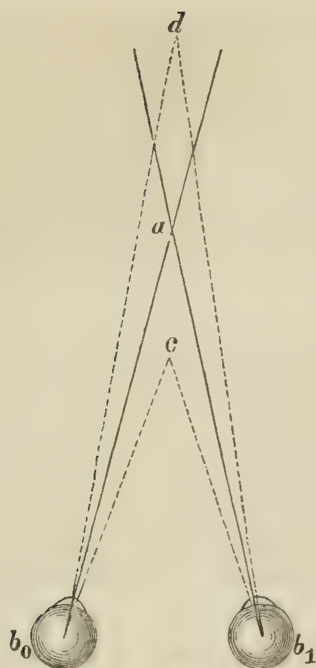


Fig. 201.

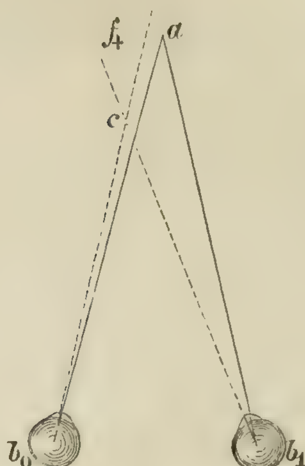


Fig. 202.

Fixationspunktes liegen, wie in *Fig. 201.* Namentlich wenn sie sich mehr von a entfernen und in die Seitentheile des Gesichtsfeldes zu liegen kommen, muss ihr Abstand und der Unterschied ihrer Helligkeit von der der Umgebung schon ziemlich bedeutend sein, wenn sie bemerkt werden sollen. Etwas deutlicher werden sie, wenn sich zur Seite von a, etwa gleich weit von den Augen abstehend wie a, ein scharf bezeichnetes Object f zwischen den verlängerten Schenkeln des Winkels $b_0 c b_1$ befindet, so dass im gemeinsamen Gesichtsfelde die Doppelbilder von c auf verschiedenen Seiten von f liegen. Man hat dann im Gesichtsfelde des Auges b_0 die scheinbare Reihenfolge acf, in dem von b_1 die Folge afc. Dann ist es leichter die Trennung der Bilder zu erkennen, als wenn man sie vor einem gleichmässig gefärbten und erleuchteten Hintergrund sieht.

Endlich kann man auch Doppelbilder sehen, wenn die Bilder desselben Punktes in den Gesichtsfeldern beider Augen zwar gleiche Distanz von dem fixirten Punkte haben, aber hinreichend verschiedene Richtung, dass deren Unterschied auffällig genug ist.

Dies ist der Fall, wenn der Punkt c höher oder tiefer und gleichzeitig den Augen ein wenig näher als der Punkt a gelegen ist.

Wir sehen also diejenigen Objectpunkte im Allgemeinen doppelt, welche in beiden Sehfeldern hinreichend verschiedene scheinbare Lage beziehlich zum Blickpunkte haben, dass diese Verschiedenheit durch die Schätzung des Augenmaasses bemerkt werden kann. Solche Objecte dagegen, welche scheinbar gleiche Lage gegen den Fixationspunkt im Sehfelde haben, sehen wir einfach.

Ich will ein von beiden Augen als einfach gesehenes Bild ein **Ganzbild** nennen, die zwei Bilder zusammengenommen, welche von demselben Objecte entworfen werden, welches nicht einfach gesehen wird, ein **Doppelbild**, jedes einzelne der letzteren dagegen ein **Halbbild**.

Wir haben nun näher zu untersuchen, welche Punkte beider Sehfelder cheinbar gleiche Lage zum Fixationspunkte haben und also im gemeinsamen

Gesichtsfelde sich decken. Ich nenne solche Punkte **Deckpunkte** oder **correspondirende Punkte**; man hat sie auch, einer besonderen theoretischen Auffassung zu Liebe, **identische Punkte** genannt. Da jedem Punkte jedes Sehfeldes ein Netzhautpunkt entspricht, so kann man auch von **Deckpunkten**, **correspondirenden** oder **identischen Punkten der beiden Netzhäute** reden. Punkte, welche einander nicht correspondiren, nenne ich mit Fechner **disparat**.

1. **Die Blickpunkte der beiden Sehfelder normaler Augen sind Deckpunkte.** Der Blickpunkt jedes Sehfeldes entspricht der anatomisch ausgezeichneten Stelle der Netzhaut, der Mitte der *Fovea centralis*, der Stelle des deutlichsten Sehens. Der Blickpunkt ist der fixirte Punkt des Gesichtsfeldes. Mit dem ausgesprochenen Satze gleichgeltend ist es also auch zu sagen, der fixirte Punkt des vor uns liegenden Raumes werde stets einfach gesehen, und ein Objectpunkt, der sich auf den beiden Centren der Netzhautgruben abbilde, werde einfach gesehen.

Es ist dies ein Satz, der sich bei allen Beobachtungen normaler Augen bestätigt, von gewissen Fällen des Schielens, wo er Ausnahmen erleidet, werden wir unten handeln.

Wenn wir nach dem Grunde dieses Verhaltens fragen, so kommen wir auf die viel besprochene Frage, warum wir mit zwei Augen doch einfach sehen. Wenn man die Sinnesempfindungen einfach als Zeichen ansieht, deren Deutung erlernt werden muss, so bietet die Beantwortung keine besondere Schwierigkeit. Fast alle äusseren Objecte afficiren gleichzeitig verschiedene Nervenfasern unseres Körpers und bringen zusammengesetzte Sinnesempfindungen hervor, die wir in ihrer Zusammensetzung als das gegebene sinnliche Zeichen des betreffenden Objects auffassen lernen, ohne uns der Zusammensetzung dieses Zeichens selbst bewusst zu werden. Im Gegentheil lernen wir die zusammengesetzte Beschaffenheit der Empfindung in den bei weitem meisten Fällen dieser Art erst durch wissenschaftliche Analyse kennen. Die Empfindung einer bestimmten Klangfarbe ist zusammengesetzt aus einer Mehrzahl von Empfindungen vieler einfacher Töne; einen Stift, den wir in der Hand halten, fühlen wir mit zwei Fingern und also durch zwei Gruppen getrennter Nervenfasern, wir riechen denselben Geruch mit zwei Nasenhöhlen, das scheinbar einfache Gefühl des Nassen, welches ein berührter Körper erzeugt, ist aus dem des Glatten und des Kalten zusammengesetzt u. s. w. In der That ist kein Grund, aus einer complicirten Wirkung auf ein so complicirtes Reagenz, wie unser Körper ist, auf ein entsprechend complicirtes Object zu schliessen.

Es wird also im Allgemeinen durchaus von der Erfahrung abhängen, ob eine häufig wiederkehrende Gruppe von Empfindungen als das sinnliche Zeichen eines oder mehrerer Objecte von uns kennen gelernt wird.

Berücksichtigen wir nun, dass der normale Gebrauch der Augen derjenige ist, wobei wir das Object, welches unsere Aufmerksamkeit zur Zeit fesselt, mit beiden Augen fixiren, also auf den Centren der beiden Netzhautgruben abbilden, mit denen wir es am genausten sehen können, so ergiebt sich daraus, dass die beiden Centra der Netzhautgruben immer Bilder desselben einen äusseren

Objects abbilden werden, dessen Einheit übrigens durch den Tastsinn, so oft als nöthig, zu constatiren ist, und dass ihre Empfindungen daher in räumlicher Beziehung immer als gleichgeltend kennen gelernt werden. Wir sehen also einfach mit beiden Blickpunkten, weil beim natürlichen normalen Gebrauche der Augen auf beiden Netzhautgruben immer dasselbe Object abgebildet ist, von dessen nur einmaligem Vorhandensein wir durch den Tastsinn unterrichtet sind oder uns unterrichten können.

Die entgegengesetzte Ansicht dagegen, wonach gewisse Empfindungen unseres Körpers schon vor aller Erfahrung gewisse Raumvorstellungen hervorzurufen im Stande sind, muss annehmen, dass die beiden Netzhautcentra ebenso, wie jedes andere Paar zusammengehöriger Deckstellen beider Netzhäute, durch einen angeborenen Mechanismus identische Raumanschauungen geben. Dies war auch der Grund, aus welchem die Deckstellen der Netzhäute zuerst als identische Stellen bezeichnet wurden. Eine kritische Vergleichung beider Ansichten lässt sich erst am Schlusse des folgenden Paragraphen geben.

Bei vielen Fällen sogenannten concomitirenden Schielens finden sich Ausnahmen von dem Gesetze, dass die Netzhautgruben Deckstellen sind, namentlich bei solchen Individuen, deren beide Augen annähernd gleich gut brauchbar zum Sehen sind. Bei der genannten Art des Schielens können beide Augen nicht parallel gerichtet werden, sondern stehen entweder convergent oder divergent, und zwar so, dass bei allen Richtungen der Gesichtslinien der Winkel der Convergenz oder Divergenz nahehin die gleiche Grösse behält. Hat ein Auge eine beträchtlich grössere Sehschärfe, als das andere, so pflegt der Kranke die Objecte nur mit dem besseren Auge zu fixiren, und nur wenn man dieses mit der Hand bedeckt, fixirt er sie mit dem andern Auge. Sind beide Augen von ziemlich gleicher Sehschärfe, so ist das Schielen alternirend, das heisst der Patient braucht zum Fixiren bald das eine, bald das andere Auge, beurtheilt übrigens mit beiden Augen die Richtung der gesehenen Gegenstände richtig. In der Mehrzahl dieser letzteren Fälle nun zeigt es sich, dass die beiden Fixationspunkte nicht mehr Deckstellen sind, sondern dem Centrum der Netzhautgrube des einen Auges eine andere, je nach der Richtung des Schielens mehr nach innen oder aussen gelegene Stelle der andern Netzhaut correspondirt. Der Schielende sieht alsdann einfach trotz der falschen Stellung seiner Augen. Der Nachweis, dass er wirklich mit beiden Augen sieht, und nicht etwa blos das eine Bild vernachlässigt, wie man sonst anzunehmen pflegte, kann geführt werden, wenn man vor eines seiner Augen ein Prisma mit der brechenden Kante nach oben oder unten gekehrt bringt. Er sieht dann, wie ein Normalsichtiger, zwei übereinanderstehende Doppelbilder des Objects. Durch das Prisma wird nämlich das Bild des einen Auges nach oben verschoben, und bei einer solchen Trennung des binocularen Ganzbildes in übereinander stehende Halbbilder kann man leicht und sicher erkennen, ob beide Halbbilder gesehen werden, und ob das eine oder das andere mehr nach rechts oder links steht. Ebenso treten Doppelbilder auf, wenn man vor das eine Auge ein Prisma mit der brechenden Kante nach links oder rechts gekehrt hält, wodurch das eine Halbbild seitlich verschoben wird, selbst wenn das Prisma so gewählt und

so gehalten ist, dass nun Bilder des gleichen Objects auf die beiden Netzhautcentra fallen. Auch wenn dergleichen Patienten noch fähig sind, durch besondere Anstrengung die Augen in parallele Stellung zu bringen, wo sie entfernte Objecte einfach sehen sollten, sehen sie diese doppelt.

Dasselbe geschieht nun auch, wenn durch eine gelungene Operation den Augen die normale Stellung wiedergegeben ist. Die Patienten werden dann in den ersten Tagen von den Doppelbildern sehr gequält, später lernen sie diese zu übersehen, bis dann endlich, nach einem Jahre oder längerer Zeit, sich das normale Identitätsverhältniss hergestellt findet. Doch geschieht das letztere nicht in allen Fällen, namentlich nicht in solchen, wo das eine Auge eine erheblich geringere Sehschärfe hat, als das andere; in solchen bleiben meist die nach der Operation auftretenden Doppelbilder in unveränderter Stellung zu einander bestehen, aber das undeutlichere wird bei der Orientirung vernachlässigt. Endlich kommen auch Fälle vor, wo diese Vernachlässigung des einen Bildes so weit geht, dass es selbst mit Hilfe von Prismen und farbigen Gläsern nicht zur Wahrnehmung gebracht werden kann.

Ebenso wie bei geringer Sehschärfe des einen Auges die Patienten nach der Operation sich von den Doppelbildern leichter befreien durch Vernachlässigung des einen, als durch Ausbildung eines neuen Identitätsverhältnisses, so bildet sich auch bei Schielenden mit einem schlecht sehenden Auge weniger leicht die beschriebene Incongruenz der Netzhäute aus. Bei solchen zeigen sich dann selbst nach jahrelangem Schielen noch immer die beiden Netzhautcentra als correspondirend. Dasselbe ist der Fall in allen denjenigen Fällen, wo der Convergenz-, beziehlich Divergenzwinkel, den die Blicklinien miteinander bilden, veränderlich ist, entweder bei verschiedener Richtung des Sehens oder periodisch wechselnd zu verschiedenen Zeiten, weil in solchen Fällen die Bilder, welche die Netzhautgrube des einen Auges treffen, auf sehr verschiedene Stellen der andern Netzhaut fallen und sich desshalb keine feste Gewöhnung der Zusammengehörigkeit ausbilden kann [1].

Auch zeigte sich in der That bei Schielenden, deren eines Auge verminderte Sehschärfe hat, dass sie beim Vorhalten eines rothen Glases vor ein Auge Doppelbilder bald sehen, bald plötzlich wieder nicht sehen, ohne dass sich die Stellung des Auges geändert hat, oder dass sie nach der Operation das farbige Halbbild bald rechts, bald wieder links von dem ungefärbten Bilde sehen, oder gar nicht zu sagen wissen, ob es rechts oder links sei. Bei einem solchen Auge, dessen Bilder wegen ihrer Unvollkommenheit wenig beachtet werden, bleibt, wie es scheint, die Orientirung überhaupt immer eine unsichere, und die Erinnerung an das vor dem Schielen vorhanden gewesene Identitätsverhältniss kämpft gleichsam mit dem neuen, was sich nicht recht sicher und bestimmt

[1] Der Nachweis, dass viele Schielende mit beiden Augen und doch einfach sehen, wurde geliefert von Pickford in Roser und Wunderlich's Archiv für physiologische Heilkunde, 1842, S. 590. Die ersten Fälle von Incongruenz beschrieben durch Albrecht v. Graefe im Archiv für Ophthalmologie, I, 1, 234; darüber auch Nagel, Das Sehen mit zwei Augen. Leipzig 1861. S. 130—135. Die Resultate aus einer grösseren Zahl von Beobachtungen giebt Alfred Graefe im Archiv für Ophthalmologie, XI, 2, p. 1—46. Ferner F. C. Donders im Archiv für die holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde, Bd. III, S. 357 und 358; *Anomalies of accommodation and refr.*, p. 164—166. Es sind dies Beobachtungen von fundamentaler Wichtigkeit für die Theorie des Binocularsehens, und wäre eine möglichst häufige und genaue Wiederholung derselben zu wünschen.

ausbilden kann. Alfred Graefe bemerkt mit Recht, dass hier gerade das Schwanken der Aussagen charakteristisch für den Vorgang sei.

2. Die Netzhauthorizonte beider Augen correspondiren einander. Ich habe oben auf Seite 462 die Netzhauthorizonte für normalsichtige Augen definirt als diejenigen Meridiane beider Augen, welche bei paralleler Richtung derselben in der Primärstellung mit der Visirebene zusammenfallen, und schon angeführt, dass diese mit einander correspondiren. Bei kurzsichtigen Augen ist das meist nicht der Fall, und ich habe oben schon vorgeschlagen, als Netzhauthorizonte diejenigen Meridiane zu betrachten, welche in die Visirebene fallen bei einer solchen Stellung der Augen, wo eine Reihe Deckstellen beider Netzhäute in der genannten Ebene liegt. Dies wird für kurzsichtige Augen meist eine etwas nach abwärts gerichtete Convergenzstellung sein. Dann würde der oben hingestellte Satz nur Consequenz der Definition des Begriffs „Netzhauthorizont" sein. Es ist aber noch zu bemerken, dass die Netzhauthorizonte auch dadurch ausgezeichnet sind, dass bei der Lage des Fixationspunktes in der Medianebene für das Augenmaass ihre Ebenen in der Visirebene zu liegen scheinen.

Genaue Bestimmungen über die Lage der Netzhauthorizonte sind von Volkmann für seine (etwas kurzsichtigen) Augen gegeben worden [1]. An einer ebenen, vor den Augen befindlichen senkrechten Wand waren zwei Drehscheiben so angebracht, dass der Drehpunkt einer jeden in der optischen Axe des bezüglichen, auf die unendliche Ferne gerichteten Auges lag. Auf jeder Scheibe war eine feine Linie verzeichnet, die entweder einen Durchmesser oder einen Radius bildete und mit der Umdrehung der Scheibe ihre Lage veränderte. Die Grösse der Drehung konnte mittels einer am Rande der Scheiben angebrachten Gradtheilung gemessen werden.

1. Versuchsreihe: Links ein Durchmesser horizontal gestellt; der Durchmesser der rechten Scheibe wurde gesucht ihm parallel zu stellen. Um die Linien getrennt zu sehen, war es nöthig, den Kopf ein wenig nach der Seite zu neigen. Im Mittel aus 30 Versuchen betrug

der Kreuzungswinkel . . . . $0^{\circ},443$
der wahrscheinliche Beobachtungsfehler . . . . . $0^{\circ},08$.

2. Versuchsreihe: Der rechte Durchmesser war horizontal gestellt, der linke wurde ihm parallel gestellt; sonst ebenso,

Kreuzungswinkel . . . . $0^{\circ},553$
wahrscheinlicher Fehler . . . . $0^{\circ},11$.

3. Versuchsreihe: Der linke Durchmesser liegt horizontal, der rechte wird so eingestellt, dass er beim Decken mit ihm eine möglichst feine Linie darstellt. Wieder im Mittel aus 30 Versuchen

Kreuzungswinkel . . . . $0^{\circ},397$
wahrscheinlicher Fehler . . . . $0^{\circ},13$.

---

[1] Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig 1864. Heft 2, S. 206—208 und

4. Versuchsreihe: Ebenso, nur ist der rechte Durchmesser festgestellt, der linke wird bewegt,

Kreuzungswinkel . . . . $0^{\circ},467$
wahrscheinlicher Fehler . . . . $0^{\circ},14$.

5. Versuchsreihe: Links ein horizontal gerichteter Radius; der Radius der rechten Scheibe wird so gestellt, dass er mit jenem eine gerade Linie zu bilden scheint. Im Mittel aus 30 Versuchen

Kreuzungswinkel . . . . $0^{\circ},46$
wahrscheinlicher Fehler . . . . $0^{\circ},125$.

6. Versuchsreihe: Ebenso, nur liegt der rechte Radius fest, der linke wird gestellt,

Kreuzungswinkel . . . . $0^{\circ},463$
wahrscheinlicher Fehler . . . . $0^{\circ},096$.

Man sieht, dass diese Versuche alle nahe übereinstimmende Resultate geben, nämlich

1.	$0^{\circ},443$
2.	$0^{\circ},553$
3.	$0^{\circ},397$
4.	$0^{\circ},467$
5.	$0^{\circ},460$
6.	$0^{\circ},463$
Mittel:	$0^{\circ},464$.

Der Sinn dieser Abweichung ist ein solcher, dass die äussere Seite jedes Netzhauthorizontes etwas tiefer liegt, als die innere.

7. Versuchsreihe: Endlich hat Volkmann noch Versuche angestellt, bei denen er nur eine Scheibe mit dem linken Auge betrachtete und den darauf gezeichneten Durchmesser horizontal zu stellen suchte; dabei stellte er im Mittel von 30 Versuchen das linke Ende um $0^{\circ},203$ zu tief.

8. Versuchsreihe: Ebenso, nur wurde das rechte Auge gebraucht. Das rechte Ende des Durchmessers wurde um $0^{\circ},233$ zu tief gestellt.

Die Summe beider Abweichungen $0^{\circ},203 + 0^{\circ},233 = 0^{\circ},436$ entspricht hinreichend genau dem oben gefundenen Kreuzungswinkel der Netzhauthorizonte.

Nach den Methoden der ersten vier Versuchsreihen fand Volkmann bei einigen andern Beobachtern den Kreuzungswinkel der Netzhauthorizonte, wie folgt

Professor H. Welcker . . . . $0^{\circ},72$
Stud. med. Käherl . . . . . . $0^{\circ},26$
Dr. Schweigger-Seidel. . . . $0^{\circ},43$.

Bei meinen eigenen Augen habe ich Versuche nach der Methode von Volkmann's 5. und 6. Reihe angestellt und finde keine merkliche Abweichung der Netzhauthorizonte, wenn ich vorher nur ferne Gegenstände angeblickt, oder durch längere Fortsetzung der Versuche meine Gesichtslinien parallel erhalten habe. Komme ich aber vom Lesen oder Schreiben, wobei meine Augen also convergirten, so finde ich eine kleine Abweichung in demselben Sinne, wie Volkmann, und von wechselnder Grösse, die bei längerer Fortsetzung der Versuche wieder verschwindet.

Herr Dr. Dastich, dessen linkes Auge normalsichtig, das rechte kurzsichtig ist, fand eine Abweichung von $0^{\circ},31$.

Was nun die vermuthliche Entstehungsweise dieses Identitätsverhältnisses der horizontalen Meridiane betrifft, so müssen wir beachten, dass wir bei Fixation eines bestimmten Objectpunktes in denjenigen beiden Meridianen der Sehfelder und der Netzhäute, welche mit der Visirebene zusammenfallen, immer eine Reihe von Bildern derselben Objectpunkte finden werden, wie auch übrigens die Schnittlinie der Visirebene mit der Oberfläche des Objects verlaufen möge. Für alle andere Meridiane dagegen wird das Verhältniss, je nach der Lage und Form des Objects sehr wechseln. Geht zum Beispiel durch den Fixationspunkt eine gerade senkrechte Linie, so werden deren Bilder in die senkrechten Meridiane der Sehfelder und auf die entsprechenden Netzhautpunkte fallen. Ist die gesehene Linie oben gegen den Beobachter hingeneigt, so fallen ihre Bilder in zwei nach oben convergirende Meridiane der Sehfelder; entfernt sie sich dagegen nach oben hin von dem Beobachter, so wird sie in zwei nach oben divergirenden Meridianen erscheinen. So ist es also mit Ausnahme der in der Visirebene gelegenen Meridiane für jeden andern Meridian je eines Auges von der Form und Lage des gesehenen Objects abhängig, welcher Meridian des andern Auges die Bilder der auf jenem abgebildeten Objectpunkte empfängt. Nur die in der Visirebene liegenden Meridiane enthalten entsprechende Bilder unabhängig von der Form und Lage der Objecte.

Nun können allerdings bei verschiedenen Richtungen der Augen verschiedene Netzhautmeridiane in die Visirebene fallen. Wir dürfen aber wohl voraussetzen, dass bei natürlicher Lebensweise des Menschen, wenn nicht zu anhaltend einseitige Beschäftigungen mit bestimmter Haltung des Körpers und der Augen eingeschlagen werden, die Augen sich überwiegend oft in oder nahe der Primärlage befinden, und dass also diejenigen Netzhautmeridiane, die in der Primärstellung der Augen mit der Visirebene zusammenfallen — das sind aber die Netzhauthorizonte —, unter allen andern am häufigsten entsprechende Bilder empfangen und daher für sie die Gewöhnung gleicher Raumprojection sich ausbildet.

Ueberwiegende Beschäftigung mit nahen Gegenständen, die mit nach unten gerichteten convergirenden Blicken betrachtet werden, würde dagegen das Auftreten einer solchen Abweichung, wie sie Volkmann an sich und anderen beobachtet hat, bedingen können, denn bei einer solchen Richtung des Blickes rücken wirklich seine Netzhauthorizonte in die Visirebene.

3. Die zu den Netzhauthorizonten scheinbar verticalen Meridiane decken sich. Es ist schon oben auf Seite 546 hervorgehoben worden, dass diejenigen Meridiane der Sehfelder, welche für das Augenmaass einen scheinbar richtigen rechten Winkel mit den Netzhauthorizonten bilden, in Wahrheit mit ihrem oberen Ende etwas nach aussen geneigt sind. Liegen also die Netzhauthorizonte in der Visirebene, so divergiren die scheinbar verticalen Meridiane etwas nach oben und convergiren nach unten. Diese selben scheinbar verticalen Meridiane, welche also in den beiden Sehfeldern scheinbar dieselbe Lage gegen den Fixationspunkt und Netzhauthorizont haben, zeigen sich als correspondirend in dem binocularen Gesichtsfelde.

Den Kreuzungswinkel der correspondirenden scheinbaren Verticallinien kann man nach denselben Methoden finden, wie den der Netzhauthorizonte, ausge-

nommen diejenige, wobei die Linien zum Decken gebracht werden. Dabei verschmelzen nämlich zwei einander ähnlich gefärbte Linien zu leicht zu einem stereoskopischen Gesammtbilde, selbst wenn sie noch ziemlich disparate Richtungen haben. Man kann dies aber vermeiden, wenn man den beiden Linien ganz verschiedene Färbung giebt, zum Beispiel einen weissen Faden auf schwarzem Grund mit einem schwarzen auf weissem combinirt. Die sichersten und übereinstimmendsten Urtheile bei solchen Vergleichungen habe ich schliesslich bei folgender Methode gewonnen.

An einer senkrechten hölzernen Tafel wird ein Blatt schwarzen Papiers ausgespannt und auf diesem neben einander befestigt erstens ein rother 3 Millimeter breiter und von zwei parallelen geraden Rändern begrenzter Papierstreifen, und zweitens ein blauer Faden. Beide erhalten nahehin senkrechte Richtung, nach oben ein wenig divergirend, und solche Entfernung von einander, dass ihr Abstand in der Höhe der Augen des Beobachters dem Abstande dieser Augen gleich ist. Der Papierstreifen wird mit beiden Enden festgesteckt, der Faden mit dem oberen Ende; sein unteres ist durch ein kleines Gewicht gespannt. Das untere Ende des Fadens schiebt man so viel, als nöthig, mit einer Nadel zur Seite, die man schliesslich fest sticht, wenn der Faden die richtige Lage hat. Man blickt nun nach dem Faden und Streifen mit parallelen Gesichtslinien, so dass der blaue Faden auf der Mitte des rothen Streifens erscheint, und verschiebt den Faden so lange, bis er in seiner ganzen Länge genau auf der Mitte des Streifens zu liegen scheint. Dann steckt man die Nadel fest. Indem man die Entfernung des Fadens vom Streifen am oberen und unteren Ende abmisst, und auch den verticalen Abstand der gemessenen Punkte, kann man den Winkel, den ihre Richtungen machen, leicht bestimmen.

Der obige Satz ergiebt sich am directesten, wenn man in der beschriebenen Weise die Abweichung der horizontalen und verticalen Decklinien bestimmt und ausserdem die Winkel, welche die zu einer Horizontallinie scheinbar normal gerichteten Linien mit jener machen. Solche Bestimmungen hat Herr Dr. DASTICH in meinem Laboratorium ausgeführt und folgende Werthe gefunden:

Winkel zwischen den scheinbar verticalen Decklinien:	2° 40′
Winkel zwischen den Netzhauthorizonten:	0° 18′
Differenz	2° 22′.

Derselbe fand die Abweichung vom rechten Winkel

für sein rechtes Auge	1° 12′
für sein linkes Auge	1° 21′
Summe:	2° 33′.

Die Differenz der ersten beiden Winkel, im Betrag von 2° 22′, ist der Winkel, den die scheinbar verticalen Meridiane mit einander bilden würden bei einer Stellung der Augen, wo die Netzhauthorizonte in die Visirebene fallen. Sie ist der Summe 2° 33′ so nahe gleich, als die Genauigkeit solcher Versuche erwarten lässt. Das heisst also, die scheinbar verticalen Decklinien unterscheiden sich nicht merklich von denjenigen Linien, die nach dem Augenmaass normal zu den Netzhauthorizonten scheinen.

Dasselbe geht übrigens auch indirect aus Volkmann's Versuchen hervor. Derselbe hat nämlich ausser den schon erwähnten Versuchen, einen monocular gegesehenen Durchmesser seiner Scheiben horizontal zu stellen (7. und 8. Versuchsreihe), auch Versuche gemacht, ihn vertical zu stellen, wobei er also die absolut verticale Richtung einzuhalten suchte, nicht die normale gegen eine horizontale sichtbare gerade Linie. Da indessen schon oben bemerkt ist, dass die Netzhauthorizonte ihm absolut horizontal erschienen unter den Umständen des Versuchs, so folgt, dass ihm die hier bestimmten scheinbar verticalen Richtungen auch normal zu den Netzhauthorizonten erscheinen mussten.

9. Versuchsreihe: Die Scheibe wird mit dem linken Auge betrachtet und der Durchmesser scheinbar vertical gestellt. Im Mittel von 30 Versuchen beträgt die Abweichung 1°,307.

10. Versuchsreihe: Ebenso mit dem rechten Auge; Abweichung im Mittel 0°,82.

Die Winkel zwischen den scheinbar verticalen Decklinien hat er nach denselben Methoden bestimmt, wie für die horizontalen, und folgende Zahlen erhalten

Methode	Mittelwerth	Wahrscheinlicher Fehler.
der Versuchsreihe 1	2°,23	0°,16
,, ,, 2	2°,06	0°,07
,, ,, 5	2°,16	0°,22
,, ,, 6	2°,14	0°,21
Gesammtmittel:	2°,15	

Nun ist die Summe der Abweichungen der jedem einzelnen Auge normal erscheinenden Linien:

$$1°,307 + 0°,82 = 2°,127$$

der Abweichung der Decklinien von einander so nahehin gleich, dass daraus folgt, die für das Augenmaass in jedem Sehfelde vertical erscheinenden Linien seien auch Decklinien, und dies entspricht wieder unserem Satze.

Auf Volkmann's Veranlassung wiederholte Herr Schweigger-Seidel die Versuche. Die Abweichung der scheinbar verticalen Linie von der wirklich Verticalen fand er für das linke Auge gleich 0°,663, für das rechte Auge gleich 0°,657. Die Summe beider Grössen ist 1°,32. Damit nahe übereinstimmend fand sich der Winkel zwischen den beiden scheinbar verticalen Decklinien bei ihm gleich 1°,44.

Volkmann hat endlich auch Versuchsreihen noch in der Weise angestellt, dass der Diameter der einen Scheibe horizontal lag und er den der andern im binocularen Gesammtbilde senkrecht zu jenem zu stellen suchte. Auch diese Versuche zeigen gute Uebereinstimmung mit den früheren und mit dem oben hingestellten Satze, dass die scheinbar verticalen Meridiane Decklinien seien, und dieser Satz ist wieder ein Fall des oben hingestellten allgemeineren, dass Linien die in den monocularen Sehfeldern scheinbar gleiche Lage haben, Decklinien sind. Nachdem nämlich festgestellt ist, dass die Netzhauthorizonte Decklinien sind, müssen die zu ihnen und dem Fixationspunkt scheinbar gleiche Lage habenden scheinbaren Verticalen auch Decklinien sein.

Der Winkel der scheinbaren Verticallinien hat bei normalsichtigen Augen, wie es scheint, immer ziemlich dieselbe Grösse von etwa $2\frac{1}{2}$ Grad; bei kurzsichtigen Augen habe ich ihn meist viel kleiner gefunden. Auch E. Hering, der kurzsichtig ist, hat ihn für seine Augen beinahe gleich Null gefunden.

In den theoretischen Untersuchungen über das monoculare Gesichtsfeld

fanden wir, dass die dort betrachteten Vorgänge bei der Ausbildung des Augenmaasses für diesen Winkel keine bestimmte Grösse ergaben, ihn vielmehr unbestimmt liessen. Gründe, die seine Grösse zu bestimmen scheinen, werden wir weiter unten in der Lehre vom Horopter finden.

4. In den scheinbar verticalen Decklinien sind Punkte, welche gleich weit von den Netzhauthorizonten abliegen, Deckpunkte. Auch hierüber liegen genaue Versuche von VOLKMANN vor. Jedes Auge hatte ein rechtwinkeliges Kreuz vor sich, gebildet aus der Horizontalen aa', *Fig. 203*, und den

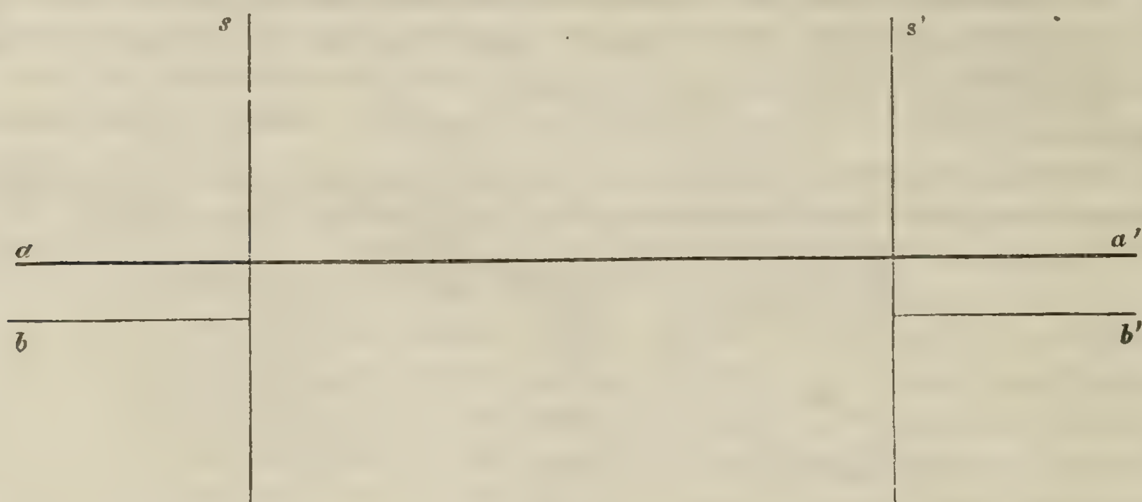


Fig. 203.

senkrechten s und s', deren Abstand dem der Augen des Beobachters gleich zu machen ist. Unterhalb der Horizontallinie und nach aussen von der Verticallinie jedes Kreuzes war eine zweite Horizontallinie b und b' gezogen, von denen die eine b fest, die andere b' beweglich war, so dass sie sich selbst parallel verschoben werden konnte. Der Beobachter fixirte die Mittelpunkte beider Kreuze mit parallelen Gesichtslinien, so dass sie sich scheinbar deckten, und verschob dann die bewegliche Horizontallinie b' so lange, bis sie scheinbar die genaue Fortsetzung der festen Horizontallinie b im andern Sehfelde bildete.

Im Mittel aus je 30 Versuchen erhielt er den Abstand der beweglichen Horizontallinie

Bewegliche Horizontale rechts:	5,51
Bewegliche Horizontale links	5,47
Abstand der festen Horizontale	5,50.

Der Abstand der Linien von den Augen war 300 Millimeter, die Differenzen zwischen den beiden verglichenen Grössen liegen unter der Grenze der wahrnehmbaren Abstände.

Um eine feste Uebung in der Vergleichung verticaler Distanzen zwischen beiden Sehfeldern zu erlangen, sind die Verhältnisse des natürlichen Sehens besonders günstig. So oft nämlich der Fixationspunkt in der Medianebene des Körpers liegt, der Blick also geradeaus gerichtet ist, können oberhalb und unterhalb des Fixationspunktes liegende Objectpunkte zwar beiden Augen in etwas disparaten Meridianen erscheinen, aber ihr Winkelabstand vom Fixationspunkte wird immer in beiden Sehfeldern derselbe sein müssen, auch wenn jene Punkte

dem Auge beträchtlich näher oder ferner liegen, als der fixirte Punkt; und es wird desshalb, so oft wir geradeaus blicken, Gelegenheit gegeben sein, Erfahrungen zu machen, welche verticale Dimensionen des einen Sehfeldes denen des andern entsprechen. Dem entsprechend werden wir später finden, dass vertical übereinander liegende Doppelbilder besonders leicht erkannt werden.

5. In den Netzhauthorizonten sind solche Punkte, welche gleich weit vom Fixationspunkt abliegen, Deckpunkte. Volkmann hat hierüber Versuchsreihen angestellt nach ähnlicher Weise wie die zuletzt erwähnten, nur dass statt der festen und beweglichen Horizontallinie rechts von der Verticallinie jedes Kreuzes eine zweite Verticallinie angebracht war, die eine fest oberhalb der Horizontallinie des Kreuzes, die andere beweglich darunter. Wieder im Mittel von je dreissig Versuchen fand sich der Abstand der beweglichen Verticallinie,

wenn sie rechts lag, ...	5,24	Millimeter.
wenn sie links lag, ...	5,21	„
Abstand der festen Verticale	5,20	„

Die Unterschiede sind hier also wieder kleiner, als die kleinsten wahrnehmbaren Grössen. Volkmann machte also auch diese Bestimmung mit sehr grosser Genauigkeit.

Ich selbst finde diese Art des Einstellens sehr viel schwerer, als die von horizontalen Linien, weil bei mir eine scheinbare stereoskopische Vereinigung der Verticallinien des Kreuzes, welche fixirt werden sollen, eintritt, auch wenn meine Blicklinien etwas mehr convergiren oder divergiren, als zur genauen Vereinigung nöthig ist; und dabei schwanken dann die seitlichen Verticallinien hin und her, so dass ich nach Belieben bald die eine, bald die andere der fixirten Verticallinien näher sehen kann. Sicherer gelingt mir der Versuch, wenn auch von den fixirten Verticallinien die eine nur oberhalb, die andere nur unterhalb der Horizontalen gezogen ist.

Die Vergleichung horizontaler Distanzen in beiden Sehfeldern kann im Allgemeinen nur dann ein constantes Resultat geben, wenn sie an unendlich entfernten Objecten, des irdischen Horizontes zum Beispiel, angestellt wird. Die Entfernung zweier Punkte des Horizontes in den Bildern beider Sehfelder muss allerdings immer die gleiche sein, und durch Vergleichung solcher Bilder werden wir lernen können, welche horizontale Strecken in beiden Sehfeldern (beziehlich auf beiden Netzhäuten) gleich gross sind. An allen näheren Gegenständen werden nur ausnahmsweise zwei horizontal neben einander gelegene Objectpunkte in beiden Sehfeldern unter gleichem Distanzwinkel erscheinen, wegen der Verschiedenheit ihrer perspectivischen Projectionen. Dem entsprechend finden wir auch, dass horizontal neben einander liegende Doppelbilder viel leichter verschmelzen und schwerer als doppelt erkannt werden, als vertical über einander liegende. Dennoch reicht, wie Volkmann's Versuche zeigen, unter günstigen Bedingungen und bei sehr häufiger Wiederholung der Versuche die vorhandene Uebung in der Vergleichung beider Sehfelder aus, um die Gleichheit oder Ungleichheit zweier solcher Distanzen ziemlich genau und richtig zu erkennen. Es kommt freilich noch hinzu, dass wegen der symmetrischen An-

ordnung beider Augen keine unsymmetrische Vertheilung der Fehler zwischen beiden Augen eintreten kann. Wenn a und a_1 zwei gleiche Strecken in den äusseren Hälften beider Sehfelder sind, b und b_1 gleich grosse auf den inneren Hälften, so ist wegen der Symmetrie der Augen kein Grund vorhanden a für grösser oder kleiner als a_1, und b für grösser oder kleiner als b_1 zu halten. Da wir ferner durch das Augenmaass richtig erkennen, dass $a = b$, und dass $a_1 = b_1$, so werden wir auch richtig erkennen, dass die Decklinien $a = b_1$ und $b = a_1$ sind.

Nachdem wir festgestellt haben, welche Richtungen in beiden Sehfeldern, beziehlich auf beiden Netzhäuten, als scheinbar horizontale Decklinien sich entsprechen, welche als verticale Decklinien, welche Längen auf den ersteren und welche auf den letzteren gleich gross erscheinen, so sind die nöthigen Stücke gegeben, um die scheinbare Lage aller Punkte des einen monocularen Gesichtsfeldes mit denen des andern vergleichen zu können. Von einer genauen Vergleichung der Lage der Doppelbilder kann, wie schon oben hervorgehoben wurde, nur in den mittleren Theilen der Sehfelder die Rede sein, da an ihren peripherischen Theilen sowohl die Erkennung der Deckstellen, wie auch die Abmessung der Distanzen durch das Augenmaass zu unsicher ist. Wir werden also den bei unserer vorliegenden Untersuchung in Betracht kommenden mittleren Theil jedes Sehfeldes als eine Ebene ansehen können.

Es sei in *Fig. 204* o der Fixationspunkt des rechten Auges in der Fläche

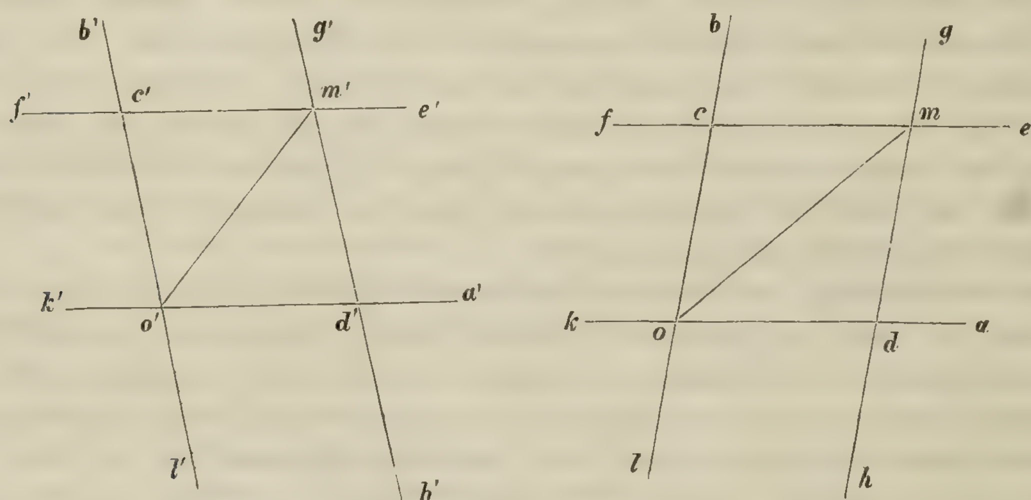


Fig. 204.

des Papiers, o' der des linken Auges; ak sei die scheinbare horizontale, bl die scheinbar verticale Linie für jenes, $a'k'$ und $l'l'$ seien dieselben beiden im andern Sehfelde. Es seien ferner $co = c'o'$ gleiche Längen auf den beiden scheinbar verticalen Linien abgeschnitten, dann erscheinen auch beide Linien gleich lang und c und c' sind Deckpunkte. Ebenso seien $do = d'o'$ gleiche Längen auf den scheinbaren Horizontalen. Durch c denke man eine Parallele ef mit ak, durch c' ebenso eine Parallele $e'f'$ mit $a'k'$ gelegt. Jeder Punkt von f muss nicht blos wirklich, sondern auch scheinbar gleich grossen Abstand von ak haben wie c, da die Abstände von parallelen Linien durch das Augenmaass richtig und genau verglichen werden können. Ebenso muss jeder Punkt von $e'f'$ scheinbar den

gleichen Abstand von $a'k'$ haben wie c', und da die scheinbaren Abstände des Punktes c von der Linie ak und des Punktes c' von der Linie $a'k'$ als gleich vorausgesetzt sind, so müssen die Linien ef und $e'f'$ in beiden Sehfeldern erscheinen als Horizontallinien, die gleichen Abstand von den sich deckenden Netzhauthorizonten haben, und müssen also selbst Decklinien sein, wenn der oben vorangestellte Satz richtig ist, dass alle Punkte, welche in beiden Sehfeldern scheinbar gleiche Lage haben, Deckpunkte seien.

Ebenso folgt, dass die Linien gh und $g'h'$ Decklinien sind, und schliesslich, dass die Punkte m und m', in denen sich ef mit gh und $e'f'$ mit $g'h'$ schneidet, Deckpunkte sind.

Diese Schlüsse zusammengefasst kann man so aussprechen, dass unter Voraussetzung der Gültigkeit des mehrerwähnten Grundsatzes diejenigen Punkte beider Sehfelder Deckpunkte sind, welche gleiche und gleich gerichtete Abstände von den scheinbar horizontalen und scheinbar verticalen Decklinien haben.

Um diesen Satz an der Erfahrung zu prüfen, kann man die stereoskopischen Figuren *D*, *Taf. VII*, gebrauchen. Um eine zu leichte Verschmelzung correspondirender Linien zu verhindern, ist die rechte Seite mit weissen Linien auf schwarzem Grunde, die linke mit schwarzen Linien auf weissem Grunde gezeichnet. Die Figuren sollen mit parallelen Blicklinien angesehen werden, so dass beide sich im gemeinsamen Gesichtsfelde scheinbar decken. Wer dies nicht erreichen kann, brauche das Stereoskop. Die rechte Seite bildet für mein rechtes Auge, die linke für mein linkes ein scheinbar genau rechtwinkeliges Gitter; ich hoffe, dass dies für die meisten normalsichtigen Leser der Fall sein wird. Andernfalls muss jeder Beobachter sich ähnliche Figuren für seine Augen passend zeichnen, so dass sowohl die horizontalen wie auch die verticalen Linien der einen Figur mit den entsprechenden der andern denjenigen Winkel bilden, welcher nöthig ist, damit sie bei paralleler Blickrichtung zur Deckung gebracht werden können. Der Abstand der Mittelpunkte beider Figuren ist gleich dem Abstande der Augenmittelpunkte des Beobachters zu machen; die Abstände der horizontalen Linien von einander sind in beiden Figuren gleich zu machen, ebenso die Abstände der Verticalen von einander.

Fixire ich nun den Mittelpunkt des rechten Gitters mit dem rechten, den des linken Gitters mit dem linken Auge, so fallen in dem gemeinschaftlichen Gesichtsfelde alle Linien des einen auf die entsprechenden des andern, was man leicht erkennen kann, da übrigens die schwarzen Linien der linken Seite nicht leicht mit den weissen der rechten Seite verschmelzen [1].

Der Versuch, der mit der *Fig. D*, *Taf. VII*, ausgeführt ist, giebt uns nun auch Aufschluss darüber, wie correspondirende Punkte in beiden Augen zu finden sind. Man richte die Gesichtslinien parallel der Medianebene auf die beiden Mittelpunkte der genannten Figuren, deren Ebene selbst senkrecht zur Gesichts-

[1] Ein Beobachter, welcher durch die grössere Anzahl der Linien verwirrt zu werden fürchten sollte, wie Herr E. Hering, kann die entsprechenden Beobachtungen auch leicht an einer Reihe von einfacheren Liniensystemen ausführen, wie ich es übrigens selbst auch gethan habe, ehe ich mir die beschriebenen Gitter construirt hatte. Ich hatte nicht geglaubt dies in meinem Aufsatze über den Horopter erwähnen zu müssen, will es hier aber ausdrücklich hervorheben, da es Veranlassung zu kritischen Einwürfen gegeben hat.

linie stehen soll, und denke sich durch die Horizontallinien der Figuren und durch die Knotenpunkte der Augen Ebenen gelegt. Diejenigen Ebenen, welche durch die mittlere Horizontallinie gehen, auf der der Fixationspunkt liegt, fallen unter diesen Umständen mit den Netzhauthorizonten beider Augen zusammen. Die anderen Ebenen schneiden sich unter einander und den Netzhauthorizont in einer zur Gesichtslinie normalen Horizontallinie, die wir die Aequatorialaxe des Netzhauthorizontes nennen wollen. Den Winkel zwischen einer der beschriebenen Ebenen und dem Netzhauthorizonte nennen wir den Höhenwinkel der betreffenden Ebene. Für alle Punkte einer solchen Ebene ist die scheinbare Höhe über der Visirebene gleich, wenn wir sie auf ein unendlich entferntes Gesichtsfeld projicirt denken; dem entsprechend nennen wir sie eine Ebene gleichen Höhenwinkels.

Ebenso denken wir uns Ebenen construirt durch jede der verticalen Linien der Figuren und den Knotenpunkt des betreffenden Auges. Die mittlere derselben, welche den Fixationspunkt enthält, ist die Ebene des scheinbar verticalen Meridians und wird von sämmtlichen anderen Ebenen dieser Art in einer zur Gesichtslinie normalen Linie geschnitten, welche wir die Aequatorialaxe des scheinbar verticalen Meridians nennen. Den Winkel zwischen einer solchen Ebene und der Ebene des scheinbar verticalen Meridians nennen wir Breitenwinkel, und zählen diesen in beiden Augen als positiv nach rechts hin, negativ nach links. Die Ebenen, welche den Breitenwinkel einschliessen, selbst nennen wir Ebenen gleichen Breitenwinkels.

Nach Feststellung dieser Begriffe lässt sich die Lage identischer Punkte in beiden Sehfeldern leicht finden. Man denke sich durch den betreffenden Punkt des Gesichtsfeldes und die Aequatorialaxen sowohl des Netzhauthorizonts als auch des scheinbar verticalen Meridians Ebenen gelegt, durch welche der Höhenwinkel und der Breitenwinkel für den betreffenden Punkt des Gesichtsfeldes gegeben wird. Identisch sind solche Punkte beider Gesichtsfelder, welche gleiche Höhenwinkel und gleiche Breitenwinkel haben.

Diese Definition identischer Punkte stützt sich auf einen direct auszuführenden Versuch. Denkt man sich die beiden Figuren, welche die Eintheilung des Gesichtsfeldes darstellen, zu unendlichen Ebenen erweitert, so erhält man die Abtheilungen der identischen Punkte bis zu 90° auf jeder Seite der Gesichtslinie. Dies genügt auch vollkommen für diesen Zweck, denn wenn auch das Gesichtsfeld jedes einzelnen Auges nach aussen etwas weiter als 90° reicht, so ist das binoculare Gesichtsfeld doch viel kleiner, weil der Nasenrücken dem andern Auge diese äussersten Theile des Feldes verdeckt. Uebrigens ist eine genaue Bestimmung der identischen Punkte durch den Versuch auch nur möglich für diejenigen Stellen beider Sehfelder, die dem Fixationspunkt ziemlich nahe liegen, denn in grösserer Entfernung wird die Entscheidung darüber, welche indirect gesehene Gegenstände beider Gesichtsfelder sich decken, welche nicht, so ausserordentlich unbestimmt, dass nur ganz erhebliche Differenzen der Doppelbilder überhaupt wahrgenommen werden können.

Es ist noch zu bemerken, dass nicht auf allen correspondirenden Meridianen der Sehfelder die Deckpunkte gleichweit vom Blickpunkte entfernt sind, wie

dies von den scheinbar horizontalen und scheinbar verticalen Decklinien gilt. Wenn man in der *Fig. 204* von den Fixationspunkten o und o' die Diagonalen om und $o'm'$ nach den Deckpunkten m und m' zieht, so ist om länger als $o'm'$ und doch sind beides correspondirende Strecken auf correspondirenden Meridianen. Der genannte Unterschied ist klein.

Bezeichnet man die Strecken

$$md = co = m'd' = c'o' \quad \text{mit} \quad a$$

und

$$mc = od = m'c' = o'd' \quad \text{mit} \quad b$$

und die Abweichung der beiden Winkel cod und $c'o'k'$ von 90^0 mit ε, so sind die correspondirenden Längen

$$mo = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \sin \varepsilon}$$

$$m'o' = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \sin \varepsilon}.$$

Relativ am grössten wird dieser Unterschied, wenn $a = b$; dann werden nämlich diese Längen

$$mo = 2a \cos \left(45^0 - \frac{\varepsilon}{2}\right) \quad \text{und} \quad m'o' = 2a \cos \left(45^0 + \frac{\varepsilon}{2}\right).$$

Wenn $\delta = 1^0\, 15'$, wie für meine Augen, so ist das Verhältniss dieser beiden Grössen wie $1 : 1{,}0215$, oder wie $47 : 48$. Um diesen Unterschied zu beobachten, habe ich das Liniensystem der *Fig. 205* angewendet. Das rechte

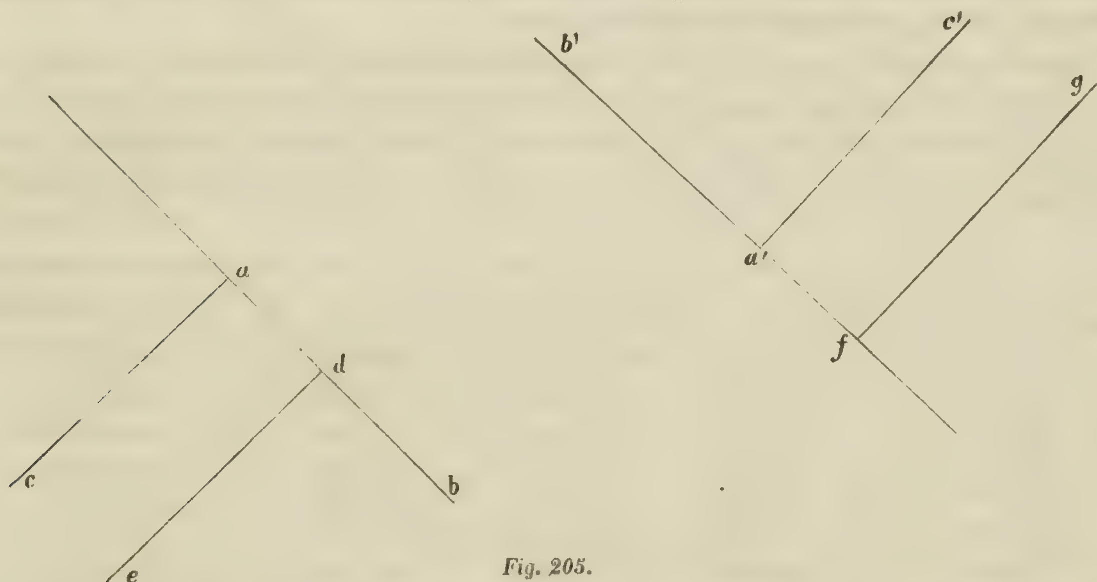


Fig. 205.

Auge fixirt a', das linke a, die Linien ac und $a'c'$ fallen dann im binocularen Bilde scheinbar in eine zusammen, ebenso ab und $a'b'$. Die Linie fg ist auf einen andern Papierstreifen gezogen, der um den entfernten Punkt g drehbar ist. Man sucht nun, während man a und a' streng fixirt, gf so einzustellen, dass sie als Fortsetzung der Linie ed erscheint. Dann fand sich, dass ich $a'f$ etwa gleich 19,5 Millimeter machte, während ad 20 Millimeter betrug. Man muss natürlich gleichzeitig genau darauf achten, dass ac und $a'c'$ als eine un-

unterbrochene Linie erscheinen. Der Unterschied, um den es sich hier handelt, liegt ziemlich an der Grenze des Wahrnehmbaren.

Ich finde, dass die zuletzt erwähnten Unterschiede sich auch merklich machen, wenn ich zwei Systeme concentrischer Kreise, das linke mit schwarzen Linien auf weissem Grund gezeichnet, das rechte mit weissen Linien auf schwarzem Grunde ausgeführt, wie *O Taf. IX*, bei fester Fixation ihrer Mittelpunkte mit parallelen Gesichtslinien zum Decken bringe. Dann decken sich die weissen und schwarzen Linien wirklich in dem verticalen und horizontalen Meridian; aber in den schräg liegenden Meridianen fallen sie neben einander, und zwar nach oben rechts und unten links die schwarzen nach aussen, dagegen oben links und unten rechts die weissen. Der nach oben rechts gerichtete Radius des rechten Feldes müsste nämlich länger gemacht werden, als der nach oben rechts gerichtete Radius des linken Feldes, um ihm gleich zu erscheinen. Folglich erscheint jener kürzer, dieser länger.

Es ergiebt sich aus der oben hingestellten Betrachtungsweise auch ein Gesetz für die Grösse derjenigen Winkel, welche verschieden gerichtete Decklinien mit einander machen. Die Berechnung, welche unten nachzusehen ist, ergiebt für die Winkeldifferenz $\varDelta$ zweier correspondirender Meridiane bei parallelen Blicklinien den Ausdruck

$$\varDelta = \gamma + 2\varepsilon \sin^2\beta,$$

worin γ der Winkel zwischen den Netzhauthorizonten in der betreffenden Augenstellung, 2ε der Winkel zwischen den scheinbar verticalen Meridianen, und β der Mittelwerth des Winkels ist, den die beiden zu vergleichenden Decklinien mit ihren Netzhauthorizonten bilden.

Eine Reihe von Messungen, welche VOLKMANN über die Winkel zwischen correspondirenden Meridianen angestellt hat [1], machen eine Vergleichung dieser Formel mit der Erfahrung möglich. In der folgenden Tabelle sind die Constanten γ und δ der obigen Formel nach der Methode der kleinsten Quadrate aus den gesammten Beobachtungen bestimmt worden.

Kreuzungswinkel correspondirender Meridiane für VOLKMANN's Augen.

Neigung gegen die Verticale $90^\circ - \beta$	Kreuzungswinkel: beobachteter Mittelwerth	wahrscheinlicher Fehler	berechnet	Differenz zwischen Beobachtung und Rechnung
0°	2°,15	0°,106	2°,166	— 0,016
15°	1°,99	0°,064	2°,062	— 0,072
30°	1°,78	0°,195	1°,781	— 0,001
45°	1°,51	0°,075	1°,397	+ 0,113
60°	1°,15 [2]	0°,114	1°,013	+ 0,137
75°	0°,81	0°,084	0°,732	+ 0,078
90°	0°,46 [3]	0°,062	0°,628	— 0,168

$\gamma = 0^\circ{,}628 \qquad 2\delta = 1^\circ{,}5575.$

Die wahrscheinlichen Fehler des Beobachtungsmittels sind aus den von VOLKMANN für die einzelnen Reihen angegebenen Werthen berechnet. Man sieht, dass die

[1] Versuch 100 bis 112 im zweiten Hefte seiner Physiologischen Untersuchungen im Gebiete der Optik. S. 202—213.

[2] Bei VOLKMANN, S. 213, ein Rechnungsfehler.

[3] Mittel aus de beiden Versuchsreihen 106 und 107.

Abweichung zwischen Rechnung und Beobachtung im Allgemeinen nicht grösser ist, als die wahrscheinlichen Fehler, welche bei solchen Beobachtungsreihen vorkommen, und wir dürfen die Uebereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtungen wohl für befriedigend ansehen.

Nachdem wir die Lage der Deckpunkte in den beiden Sehfeldern bestimmt haben, können wir dazu übergehn, die Lage derjenigen Punkte des äusseren Raumes zu bestimmen, welche sich auf correspondirenden Stellen beider Netzhäute abbilden und deshalb einfach gesehen werden. Man nennt den Inbegriff dieser Punkte den Horopter. Derselbe ist im Allgemeinen eine Curve doppelter Krümmung, welche als die Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades (Hyperboloide mit einer Mantelfläche, Kegel oder Cylinder) angesehen werden kann. Die Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades ist im Allgemeinen vom vierten Grade, das heisst, kann von einer Ebene in je vier Punkten geschnitten werden. In dem hier vorliegenden Falle haben aber die beiden schneidenden Flächen eine gerade Linie gemein, welche nicht Horopter ist, und der Rest der Schnittlinie ist eine Curve dritten Grades, das heisst eine solche, welche von einer beliebigen Ebene nur in drei Punkten geschnitten werden kann. Diese Curve hat die bemerkenswerthe Eigenschaft, dass wenn man durch irgend einen festen Punkt derselben einerseits und durch alle andern Punkte der Curve andererseits gerade Linien legt, diese Linien einen Kegel zweiten Grades bilden. Wählt man als Spitze des Kegels einen unendlich entfernten Punkt der Curve (dieselbe läuft nämlich mit mindestens zwei Aesten in das Unendliche hinaus), so wird der Kegel ein Cylinder, dessen Basis eine Curve zweiten Grades ist. Um eine Anschauung von der Gestalt einer solchen Curve dritten Grades zu geben, können wir uns dieselbe auf eine Cylinderfläche gezeichnet denken und die Cylinderfläche in die Ebene abgerollt.

Die ausgezogene Curve *eabcf* der *Fig. 206* würde dann die Form der

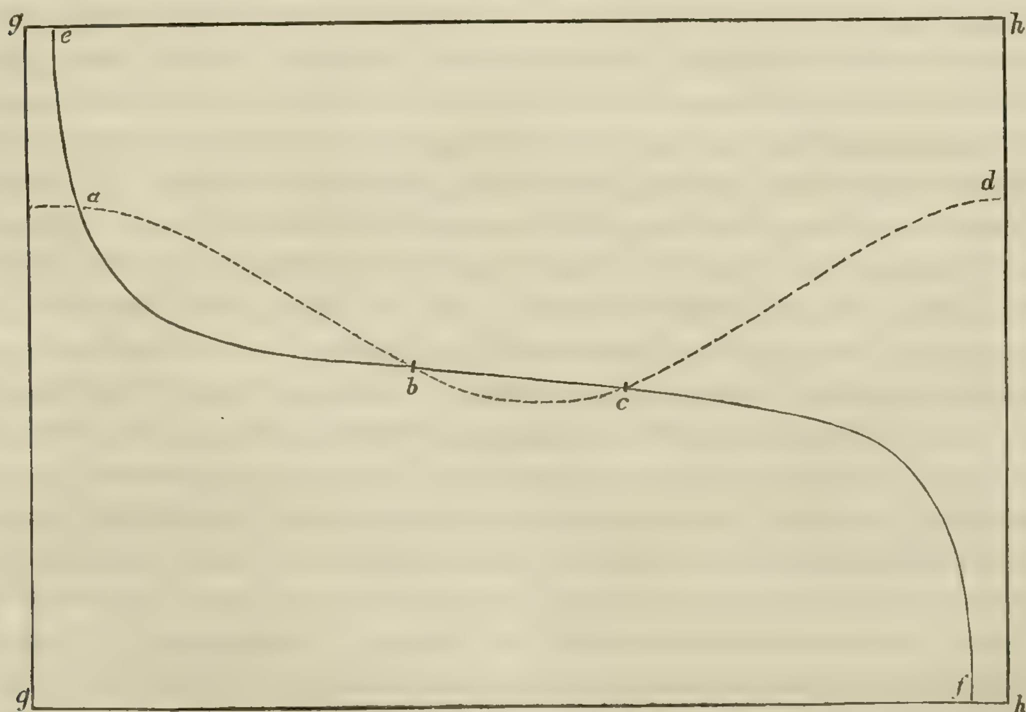


Fig. 206.

Curve darstellen. Man denke sich das Papier zu einem Cylinder mit kreisförmiger Basis zusammengerollt, so dass die Linien *gg* und *hh* aufeinander fallen, so würde die gezeichnete Curve die Form einer Curve dritten Grades erhalten. Die punktirte Curve bezeichnet die Schnittlinie einer Ebene (zum Beispiel der Visirebene) mit dem Cylinder. Von dieser Ebene wird die Curve dritten Grades in drei Punkten *a*,*b*,*c* geschnitten. An zwei Stellen *e* und *f* läuft die Curve in das Unendliche aus, indem sie sich asymptotisch der geraden Linie *gg* oder der damit identischen *hh* nähert.

Betrachten wir die Curve dritten Grades als Horoptercurve, so muss dieselbe durch die Mittelpunkte der Visirlinien beider Augen gehen. Es seien *b* und *c* die Orte der beiden Augen, *a* der Fixationspunkt. Dann fällt das Stück der Curve, welches zwischen ihnen liegt, nämlich *bc* zwischen beide Augen in das Innere des Kopfes und kann nicht als Theil des Horopters (wenigstens nicht nach dem gewöhnlichen Sprachgebrauche, dem die oben gegebene Definition entspricht) angesehen werden, weil Punkte dieses Theils, wenn sie Strahlen aussenden und diese wirklich in beide Augen fallen könnten, sich auf den beiden äusseren, also nicht correspondirenden Netzhauthälften abbilden würden; wie denn überhaupt die ganze Bestimmung des Horopters für die den Augen sehr nahe gelegenen Raumpunkte, von denen sie nur breite Zerstreuungsbilder bilden können, alle praktische Bedeutung verliert. Der Horopter, als solcher, besteht dann also aus zwei vollkommen getrennten Zweigen, *eb* und *fc*, aus denjenigen beiden Stücken der Curve dritten Grades, welche zwischen den Augen und Unendlich liegen. Da es für die mathematische Behandlung bequemer ist, die Curve dritten Grades in ihrem ganzen Zusammenhang zu betrachten, wollen wir sie die Horoptercurve nennen und den Namen des Horopters oder Punkthoropters für diejenigen Stücke derselben bewahren, welche einfach gesehen werden. In der Horoptercurve schneiden sich also correspondirende Visirlinien, aber bald beide mit ihren vorderen Abschnitten, bald die eine nur mit der hinteren Verlängerung; wo das letztere geschieht, ist sie nicht Horopter.

Unter gewissen Bedingungen kann die Horoptercurve sich übrigens ihrer geraden Asymptotenlinie *gg* und der zu einer ebenen Curve zweiten Grades zusammengelegten Linie *aa* so weit nähern, dass sie mit ihnen zusammenfällt. Dann besteht die Horoptercurve also aus einer geraden Linie und einer ebenen Curve zweiten Grades, die sich in einem Punkte schneiden. Die beiden getrennten Zweige der Horoptercurve sind dann in diesem Schnittpunkte zusammengestossen. Es geschieht dies, so oft die beiden Netzhauthorizonte gleiche, aber nach entgegengesetzten Seiten gekehrte Winkel mit der Visirebene bilden, während der Fixationspunkt in endlicher Entfernung liegt, und diese Bedingung ist bei Augen, deren Bewegungen dem Listing'schen Gesetze folgen, wiederum erfüllt, wenn der Fixationspunkt entweder in der Medianebene des Kopfes, oder in der Primärlage der Visirebene liegt. Im ersten Falle liegt der Fixationspunkt auf der geraden Horopterlinie, im zweiten auf dem Kegelschnitt, der unter dieser Bedingung ein Kreis wird, J. Müller's Horopterkreis. Und endlich wenn der Fixationspunkt sowohl in der Medianebene des Kopfes, als auch in der Primärlage der Visirebene liegt, so schneiden sich in ihm die gerade Ho-

ropterlinie und der Kreis. Genauere Constructionsmethoden für die Lage der Horopterlinien werden unten mit der mathematischen Theorie des Horopters gegeben werden.

In einem einzigen Falle ist der Horopter eine Fläche, und zwar eine Ebene, wenn nämlich der Fixationspunkt in der Medianebene in unendlicher Entfernung liegt und die Netzhauthorizonte, wie es bei normalsichtigen Augen mindestens sehr angenähert zu sein pflegt, dabei in der Visirebene liegen. Diese Horopterebene ist dann der Visirebene parallel; ihre Entfernung von dieser hängt ab von der Grösse der Divergenz der scheinbar verticalen Meridiane beider Sehfelder; sie geht nämlich durch die Schnittlinie der genannten beiden Meridianebenen und pflegt für normalsichtige Augen, die geradeaus gegen den Horizont gerichtet sind, mit der Fussbodenebene des stehenden Beobachters nahehin zusammenzufallen, während sie bei kurzsichtigen meist in grösserer Entfernung liegt.

Die Entfernung der Mittelpunkte meiner Augen von einander ist 68 Millimeter, ihre Höhe über dem Boden 1660. Legt man durch ihre Mittelpunkte und die Medianlinie des Fussbodens Ebenen, so schneiden sich diese unter einem Winkel von 2° 20′ 48″; der Winkel zwischen meinen scheinbar verticalen Meridianen beträgt 2° 22′. Bei Herrn Dr. Knapp, welcher normalsichtig ist, beträgt die Augendistanz 62,5, die Höhe der Augen über dem Boden 1627 Millimeter. Dies entspricht einem Winkel von 2° 14′ 20″. Die Beobachtung ergab im Mittel 2° 8′. Bei Herrn Professor Volkmann, der schwach kurzsichtige Augen von derselben Distanz und nahehin derselben Höhe über dem Boden hat, wie ich selbst, ist die Abweichung etwas grösser, da der Winkel zwischen den scheinbar verticalen Meridianen nur 2° 9′ beträgt. Bei Herrn Dr. Dastich ist die Augendistanz 62,8, die Höhe über dem Boden 1640, der entsprechende Winkel würde 2° 11′ sein; der Convergenzwinkel der verticalen Meridiane war bei ihm grösser 2° 33′ bis 2° 40′.

Ich halte es für nicht unwahrscheinlich, dass in diesem Verhältniss der Grund für die schiefe Lage der scheinbar verticalen Meridiane liegen mag. Wir sahen oben, dass das Augenmaass im monocularen Gesichtsfelde keinen sicheren Anhaltspunkt für ihre Feststellung giebt, weil Winkel, deren Schenkel nicht übereinstimmende Richtung haben, nicht durch Deckung mit denselben Netzhautstellen verglichen werden können. Wenn wir nun beide Augen gebrauchen und sie auf weit entfernte Gegenstände richten, welche allein constante Resultate für die Vergleichung der Ausmessungen beider Sehfelder geben, so haben wir oberhalb des Horizonts meist den Himmel, der bei Tage keine scharfgezeichneten Objecte darbietet, und unterhalb des Horizonts den Fussboden, der nicht nur bestimmte Merkpunkte in Menge darzubieten pflegt, sondern dessen Beachtung im indirecten Sehen wesentlich nothwendig ist, wenn wir vorwärts gehen. Daraus kann sich dann bei normalsichtigen Augen die Uebung bilden, die Bilder derjenigen Netzhautpunkte gleich zu localisiren, auf welchen beim Gehen die gleichen Punkte des Bodens sich abzubilden pflegen. Kurzsichtige Augen, die den Fussboden nicht deutlich sehen, werden diesem Einflusse entzogen sein und ihre Identitätsverhältnisse mehr an nahen Gegenständen ausbilden müssen.

Zu erwähnen ist noch, dass wenn bei aufrechter Haltung des Körpers und Kopfes ein Punkt der Fussbodenlinie betrachtet wird, der auch in der Median-

ebene des Kopfes liegt, zwar nicht die ganze Bodenebene Horopter ist, aber doch die gerade Horopterlinie ganz in die Bodenfläche fällt.

Es scheinen übrigens auch Augen vorzukommen, bei denen die scheinbar verticalen Meridiane nicht ganz gerade sind, sondern in der Gegend des Fixationspunktes eine schwache Knickung haben, so dass ihre oberen Hälften einen kleineren Winkel mit einander machen, als die unteren. Ein in optischen Beobachtungen sehr geübter Studirender beschrieb mir die Erscheinungen in seinen Augen so. Da scheint dann der Einfluss des Fussbodens nur für die unteren Theile der Sehfelder (obere Netzhauthälften) sich geltend gemacht zu haben, während für die anderen Theile nicht das Bedürfniss gerade Linien als gerade zu sehen entscheidend war, sondern Beobachtungen an steiler stehenden Objectflächen ein selbständiges Identitätsverhältniss ausbildeten.

Die bisherigen Angaben bezogen sich auf den Horopter, als Ort von Punkten, welche einfach gesehen werden sollen. Wenn Linien einfach gesehen werden sollen, so ist nur nöthig, dass die Linien beider Netzhäute, auf denen sie abgebildet sind, Decklinien seien, ohne dass gerade Punkt für Punkt der Bilder correspondirt. Wenn ein zweites Bild einer Linie in Richtung der Linie selbst verschoben ist, kann es mit dem ersten doch noch in ganzer Länge sich decken. Dieser Fall wird namentlich an geraden Linien, die sich in sich selbst fortdauernd congruent verschieben können, vorkommen. Die Fläche, in welcher gerade Linien bestimmter Richtung liegen müssen, um in dieser Weise zwei correspondirende Bilder zu liefern, heisst ein Linienhoropter. Derselbe heisst Verticalhoropter für die Linien, die in den beiden Sehfeldern normal zu den Netzhauthorizonten erscheinen, Horizontalhoropter für die, welche den Netzhauthorizonten parallel erscheinen. Ein solcher Linienhoropter für Linien, deren Bilder in den Sehfeldern parallele Richtung haben, ist im Allgemeinen ein Hyperboloid mit einer Mantelfläche, was in besonderen Fällen in einen Cylinder oder Kegel übergehen kann. Der Linienhoropter für solche Systeme gerader Linien, die sich in einem Punkte der Horoptercurve schneiden, ist ein Kegel zweiten Grades, welcher den gemeinsamen Schnittpunkt mit den andern Punkten der Horoptercurve verbindet.

Ueberhaupt wird jede gerade Linie, welche durch zwei Punkte der Horoptercurve geht, einfach gesehen, und durch jeden binocular gesehenen Punkt des Raumes lässt sich mindestens eine einfach erscheinende gerade Linie legen. Diese letztere lässt sich folgendermassen finden. Von dem betreffenden Punkte werden die Visirlinien nach beiden Augen gezogen; die eine sei bezeichnet mit a, die andere mit b'. Im ersten Auge giebt es eine Visirlinie b, die mit b' correspondirt, und im zweiten Auge eine solche a', die mit a correspondirt. Man lege eine Ebene durch a und b, eine zweite durch a' und b'; die Linie, in der beide Ebenen sich schneiden, ist die gesuchte einfach gesehene Linie.

Ich lasse hier noch die Beschreibung der Constructionen folgen, mittels deren man in den beiden oben erwähnten einfacheren Fällen die Lage des Vertical- und Horizontalhoropters und damit auch die Lage der Horoptercurve finden kann, unter der Voraussetzung, dass die Augen des Beobachters dem Bewegungsgesetze von Listing folgen und in der Primär-

stellung keine merkliche Abweichung der Netzhauthorizonte von der Visirebene haben.

A. Fixationspunkt in der Medianebene. Der Verticalhoropter ist ein Kegel, der Horizontalhoropter besteht aus zwei sich schneidenden Ebenen, die Horoptercurve aus einer geraden Linie und einem ebenen Kegelschnitt.

In *Fig. 207* falle die Ebene der Zeichnung zusammen mit der Medianebene

Fig. 207.

des Kopfes des stehenden Beobachters, und die Haltung des Kopfes sei so, dass die Primärlage der Blicklinien horizontal und parallel Ao in die Ferne gerichtet sei. Der Punkt o sei der zwischen den Mittelpunkten der Visirlinie beider Augen mitten inne gelegene Punkt. Man errichte in o das Loth oa auf der Linie oA und mache es so lang, dass sich in seinem tiefsten Punkte a die scheinbar verticalen Aequatorialaxen der Augen, wie sie in der Primärlage der Blicklinien gestellt sind, schneiden. Eine horizontal durch a gelegte Ebene, die durch DE geht, ist dann der Horopter für die Sehrichtung oA. Diese Ebene fällt, wie bemerkt, bei normalsichtigen Augen nahehin mit der Fussbodenfläche zusammen.

Nun werde B Fixationspunkt, welcher Punkt in der Ebene der Zeichnung, das heisst in der Medianebene des Kopfes des Beobachters angenommen wird. Bo ist die Schnittlinie der Visirebene mit der Medianebene. In der Visirebene denken wir uns den Müller'schen Kreis construirt, der durch B und die Centra der Visirlinien beider Augen geht; sein medianer Durchmesser sei Bp. Man errichte auf Bp das Loth pb, in welchem die Spitze des Verticalhoropterkegels liegt.

Um den Ort dieser Spitze zu finden, nehmen wir einen dritten Fixationspunkt zu Hilfe C, der so gewählt ist, dass wenn wir unter o' das Centrum der Visirlinien des einen oder andern Auges verstehen, welcher Punkt also etwas vor oder hinter der Ebene der Zeichnung in einem in o errichteten Perpendikel liegen müsste, dann die Linie Co' den Winkel $Ao'B$ halbirt.

Die Visirebene für den Fixationspunkt C ist dann die eine Ebene des Horizontalhoropters für den Fixationspunkt B. Die zweite Ebene des Horizontal-

horopters ist die Medianebene. Construirt man in der Visirebene für C den MÜLLER'schen Kreis, das heisst einen Kreis, der durch den Fixationspunkt und die beiden Centra der Visirlinien geht, und dessen Durchmesser Cq sein möge, so werden einfach gesehen 1. alle geraden Linien überhaupt, welche in der Ebene Coo' liegen, 2. alle gerade Linien in der Medianebene, welche durch den Punkt q gehen. Bei den letzteren aber freilich correspondirt das Bild ihres entfernteren Endes im einen Auge mit dem Bilde des näheren Endes im andern.

Man errichte in q ein Loth auf Cq, welches die Linie DE in c schneidet, dann ist Bc die gerade Horopterlinie und der Punkt f, in welchem sich Bc und pb schneiden, ist die Spitze des Verticalhoropterkegels, welcher übrigens durch den MÜLLER'schen Kreis vom Durchmesser Bp in der Visirebene des Beobachters geht, und dadurch gegeben ist.

Während also die eine Linie des Punkthoropters die Gerade Bf ist, ist die zweite diejenige Ellipse, in welcher der Kegel die Ebene Coo' schneidet.

Der Schnitt Bp des Kegels ist kreisförmig und steht rechtwinkelig auf der Kante pf des Kegels; ein Schnitt, der auf der diametral gegenüber liegenden Kante Bf senkrecht steht und die Medianebene in Go schneiden mag, muss ebenfalls kreisförmig sein. Die durch die Mittelpunkte der Augen gelegten Schnitte des Kegels, welche zwischen Bo und Go hineinfallen, müssen Ellipsen mit längerer Queraxe sein. Die ausserhalb des Winkels BoG fallen, wie Co müssen Ellipsen mit längerer medianer Axe sein, beziehlich Parabeln oder Hyperbeln, wenn sie die Linie Bf erst jenseits f schneiden sollten.

B. Der Fixationspunkt in der Primärlage der Blickebene. Der Verticalhoropter ist in diesem Falle ein Hyperboloid, welches die Visirebene in einem Kreise (MÜLLER'schen Horopterkreise) schneidet, der durch den Fixationspunkt und die beiden Centra der Visirlinien geht. Der Horizontalhoropter besteht aus zwei Ebenen, von denen die eine die Visirebene, die andere normal dazu ist. Die Horoptercurve besteht aus dem MÜLLER'schen Kreise und einer geraden Linie.

Es seien in *Fig. 208* a und b die Centra der Visirlinien für beide Augen, c der fixirte Punkt, so ist der durch abc gelegte Kreis der MÜLLER'sche Horopterkreis und ein Theil der Horoptercurve. Es sei ferner fg die Medianlinie der Visirebene, so schneidet die gerade Horopterlinie den Kreis in f, also seitlich vom Fixationspunkte. Man ziehe den Durchmesser cd und die Linie fd. In letzterer errichte man eine Ebene normal zur Ebene des Kreises; diese ist die zweite Ebene des Horizontalhoropters. Alle geraden Linien, die in dieser Ebene liegen und durch den Punkt d gehen, werden einfach gesehen; andererseits auch alle geraden Linien, die in der Visirebene liegen.

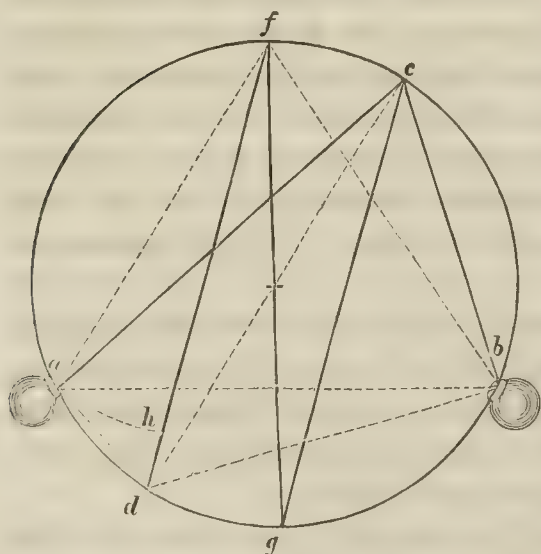


Fig. 208.

Um die gerade Horopterlinie vollständig zu construiren, schneide man auf fd die Länge $fh = fa$ ab, errichte in h ein Loth auf der Visirebene; dieses schneidet die Fussbodenfläche, das heisst die unendliche Horopterebene für die Primärlagen der Blicklinien, in demselben Punkte wie die gerade Horopterlinie, und dadurch ist letztere zu finden.

Wenn die Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane gleich Null ist, wird die gerade Horopterlinie senkrecht zur Ebene des Kreises.

Empirisch kann man die Richtung des Linienhoropters finden, wenn man einen glänzenden geraden Draht oder einen weissen gespannten Faden vor dunklem Grunde so richtet, dass man ihn durch zwei verschiedenfarbige Gläser einfach sieht, oder besser so, dass man bei etwas vermehrter oder verminderter Convergenz der Augen ihn in parallelen Doppelbildern erblickt. Hält man zum Beispiel einen senkrechten Draht nahe vor die Augen in der Medianebene des Kopfes und fixirt seine Mitte bei horizontaler Blickrichtung, so wird man finden, dass sein oberes Ende im rechten Auge etwas nach links, im linken nach rechts hinüber geneigt erscheint. Fixirt man einen Punkt, der nahe hinter der Mitte des Drahtes liegt, so erscheint dieser in nach oben divergirenden gekreuzten Doppelbildern; fixirt man einen etwas näheren Punkt, so erscheint der Draht in nach unten divergirenden ungekreuzten Doppelbildern. Um den Draht durch zwei farbige Gläser genau einfach, oder um ihn in genau parallelen Doppelbildern zu sehen, muss man sein oberes Ende etwas vom Beobachter entfernen. Es wurde diese Erscheinung zuerst von Baum beobachtet und von Meissner, wie früher erwähnt ist, zur Untersuchung der Raddrehungen der Augen benutzt. Sowie nämlich durch Raddrehung der Winkel zwischen den scheinbar verticalen Decklinien verändert wird, muss auch die Neigung des Drahtes gegen die Visirebene geändert werden, wenn er einfach erscheinen soll. Je entfernter der Fixationspunkt und je mehr die Blickebene gehoben ist, desto stärker muss der Draht gegen diese Ebene geneigt werden. Bei gesenkter Blickrichtung und nahem Fixationspunkte dagegen kann er senkrecht gegen die Blickebene, oder sogar mit seinem oberen Ende dem Beobachter zugeneigt stehen.

Nachdem wir in solcher Weise bestimmt haben, welche Dimensionen in beiden Sehfeldern als gleich und ungleich erscheinen, haben wir noch die Genauigkeit dieser Vergleichung der Sehfelder zu untersuchen. Diese Genauigkeit ist, wie schon im vorigen Paragraphen erörtert wurde, sehr gross, wenn es sich wie beim gewöhnlichen Gebrauche der Augen darum handelt, Verschiedenheiten der Tiefendimensionen der gesehenen Objecte zu erkennen. Die Vergleichung ist dagegen verhältnissmässig ungenau und mancherlei Täuschungen unterworfen, wenn es sich darum handelt, Doppelbilder zu erkennen, oder die Lage der Bilder in den beiden Sehfeldern zu vergleichen. Obgleich das letztere der einfachere Vorgang zu sein scheinen könnte, während die Beurtheilung des stereoskopischen Reliefs mannigfache Erfahrungsmomente zu Hülfe nehmen muss, so ist die letztere doch um so besser eingeübt, weil sie von der hervorragendsten praktischen Wichtigkeit ist, während die Wahrnehmung der Doppelbilder und ihrer Lage gegen einander nur die Erscheinung der Objecte, nicht diese selbst betrifft. Ebenso vergleichen wir die wirklichen Dimensionen zweier ver-

schieden entfernter Objecte viel sicherer, als die Gesichtswinkel, unter denen sie erscheinen, obgleich die letzteren unmittelbar gleichen oder ungleichen Netzhautstrecken entsprechen, während bei ersterer Vergleichung eine lange Einübung durch Erfahrung nothwendig ist, um den Einfluss der Entfernung auf die Grösse der Netzhautbilder desselben Objects kennen zu lernen.

Was zunächst die Beurtheilung der Tiefendimensionen mittels des binocularen Sehens betrifft, so geschieht diese am genauesten bei denjenigen Objecten, welche im Horopter liegen und genau einfach gesehen werden, gewisse oben schon erwähnte Täuschungen ausgenommen, die von mangelhafter Schätzung der Convergenz der Gesichtslinien herrühren. Weniger genau ist dieselbe für Objectpunkte die sich zwar vom Horopter entfernen, aber noch nicht so weit, dass die entstehenden Doppelbilder als solche wahrgenommen würden, am geringsten endlich bei Objecten, welche in deutlich getrennten Doppelbildern erscheinen, um so geringer, je weiter diese auseinander treten.

Ich habe schon früher [1] darauf aufmerksam gemacht, und dasselbe ist durch E. Hering [2] bestätigt worden, dass die Doppelbilder keineswegs, wie es die ältere Annahme war, in der gleichen Entfernung wie das fixirte Object erscheinen und etwa auf eine imaginäre Horopterfläche, die durch den Fixationspunkt gehen sollte, projicirt würden. Sondern die Doppelbilder erscheinen nahehin in der richtigen Entfernung, wo sich das entsprechende Object befindet. Man kann sich davon durch einfache Versuche leicht überzeugen. Man fixire ganz fest und ohne die Augen zu verwenden einen Punkt der Wand in der Entfernung von einigen Fuss und halte dabei ein Blatt steifen Papiers so vor den unteren Theil des Gesichts, dass sein oberer Rand einige Zoll vor den Augen und ungefähr in derselben Höhe liegt. Der Papierschirm verdeckt in dieser Stellung alle Gegenstände, die vor dem Beobachter unterhalb seiner Visirebene liegen. Nun lasse man von einem seitlich stehenden Gehilfen eine Stricknadel von unten her in einer beliebig von ihm gewählten Entfernung so in die Höhe schieben, dass ihr oberes Ende dem Beobachter sichtbar, und zwar, wenn dieser gut und sicher fixirt, von Anfang an nur in Doppelbildern sichtbar wird. Sogleich wird der Beobachter eine Vorstellung von der Entfernung des Drahtes erhalten, auch wenn er nicht ein einziges Mal seinen Fixationspunkt verlassen und die Nadel einfach gesehen hat. Zur Probe versuche er nach dem verdeckten Theile derselben zu greifen, so dass ihm seine Hand auch durchaus verdeckt bleibt. Er wird den Draht gleich beim ersten Versuche treffen, oder wenigstens ganz nahe daran vorbeifahren. Damit der Beobachter hierbei kein Urtheil aus der scheinbaren Dicke des Drahtes auf seine Entfernung bilde, was freilich kaum zu fürchten ist, lasse er den Gehilfen aus einem Vorrath verschieden dicker Nadeln eine beliebige wählen.

Auch bei den Versuchen mit beweglichen stereoskopischen Objecten, welche scheinbar ihre Entfernung vom Beobachter ändern, wie bei dem oben, S. 688 beschriebenen Instrumente von Halske, kommen oft deutlich getrennte Doppel-

---

[1] Archiv für Ophthalmologie. X, 1, S. 27.
[2] Beiträge zur Physiologie. Heft 5, S. 335.

bilder zum Vorschein, namentlich bei schneller Bewegung, der die Blicklinien nicht schnell genug folgen können, wodurch aber die Täuschung über die scheinbare Tiefenbewegung durchaus nicht gehindert wird.

Nur bei sehr weit getrennten Doppelbildern, wie sie namentlich von weit entfernten Objecten sich bilden, wenn ein naher Gegenstand fixirt wird, und an denen kaum noch die Zusammengehörigkeit beider Bilder erkannt wird, hört die binoculare Tiefenwahrnehmung auf und es kann dann wie beim monocularen Sehen die Winkelgrösse des entfernten Objects mit der Winkelgrösse des fixirten verglichen werden. Von dem fixirten Objecte kennt man aber die wahre lineare Grösse, und diese wird dann unwillkührlich der Maasstab auch für das Bild des entfernteren Objects. Wendet man sich also zum Beispiel gegen die Häuser jenseits der Strasse und fixirt den vorgehaltenen Finger, so werden die in weit getrennten Doppelbildern sichtbaren Häuser scheinbar grösser, wenn man den Finger entfernt, kleiner, wenn man ihn nähert. Im ersten Falle nimmt die Winkelgrösse des Fingers ab; relativ zu ihm wird die Winkelgrösse der Häuser also grösser, und wir brauchen den Finger als constanten Maasstab, da dessen lineare Grösse und Entfernung fortdauernd deutlich wahrgenommen wird, die der entfernten Häuser aber nicht.

Wie nun bei solchen weit von einander getrennten Doppelbildern die zunehmende Unsicherheit der binocularen Tiefenwahrnehmung leicht auffällt, so lässt sich andererseits auch für die ganz und beinahe einfach gesehenen Objecte nachweisen, dass ihr Relief desto genauer erkannt wird, je weniger sie sich vom Horopter entfernen, — abgesehen immer von den oben erwähnten besonderen Täuschungen.

Um dies für die gerade Horopterlinie zu zeigen, nehme man eine dünne gerade Stricknadel und biege sie in der Mitte ganz wenig, so dass ihre beiden Hälften einen Winkel von etwa 175° mit einander machen. Man halte sie dann vor sich, so dass beide Schenkel dieses Winkels in der Medianebene des Kopfes liegen, wobei sie für ein Auge, was sich auf dem Nasenrücken des Beobachters befände, ganz gerade erscheinen würde, und auch für jedes der wirklichen Augen die schwache Biegung, in starker perspectivischer Verkürzung gesehen, ganz unmerklich wird. Doch erkennt man unter diesen Umständen, mit beiden Augen zugleich sehend, die Knickung der Nadel, vorausgesetzt dass diese ungefähr die Richtung der geraden Horopterlinie hat, und also bei Fixation eines entfernteren oder etwas näheren Punktes in merklich parallelen Doppelbildern erscheint. Man erkennt die Knickung der Nadel aber nicht, wenn man derselben eine andere Richtung in der Medianebene giebt, wobei sie einen erheblichen Winkel mit der geraden Horopterlinie macht.

Für den Müller'schen Horopterkreis habe ich den Versuch in folgender Weise eingerichtet: Auf einen Tisch, nahe über dessen Rande sich meine Augen befanden, legte ich neben einander zwei Brettchen. In das eine wurden neben einander, etwa ein Centimeter von einander entfernt, zwei feine lange Stecknadeln festgesteckt, in das zweite Hölzchen eine Nadel derselben Art. Die Hölzchen wurden so neben einander gelegt, dass die drei Nadeln sich etwa gleich weit vom Beobachter befanden, die beiden äusseren gleich weit von der

mittleren entfernt. Ein passender Schirm bewirkte, dass ich nur die Köpfe und den oberen Theil der drei Nadeln sehen konnte, die etwa 50 Centimeter von meinen Augen entfernt waren. Ich untersuchte nun, wie weit ich die seitliche Nadel nach vorn oder hinten verschieben konnte, ehe ich merkte, dass die drei Nadeln nicht mehr in einer Ebene, sondern in einem Bogen standen. Wenn die Verschiebung auch nur eine halbe Nadeldicke, also etwa ein Viertel Millimeter betrug, merkte ich es schon. Der Winkelunterschied in der Stellung der mittleren Nadel im Verhältniss zu den beiden äusseren betrug hierbei nur 21 Secunden. Um aber eine so grosse Genauigkeit zu erreichen, musste die Richtung der Nadelreihe der Richtung entsprechen, die der Horopterkreis an dem betreffenden Orte hatte. Wenn die Nadeln also gerade vor mir, die mittlere in der Medianebene meines Kopfes und die rechte und linke gleich weit von mir entfernt waren, so urtheilte ich mit grosser Genauigkeit, ob sie in einer Ebene standen. Befand sich aber die rechte Nadel etwas näher zu mir, die linke ferner, so war ich weit weniger sicher in der Entscheidung, ob sie in einer geraden Linie oder in einem Bogen standen. Befand sich die mittlere Nadel dagegen rechts seitwärts von der Mittelebene meines Kopfes, wo die Richtung des Horopterkreises sich nach rechts hin dem Beobachter nähert, so musste auch die rechte Nadel mir etwas näher stehen, als die linke, wenn ich die grösste Sicherheit in der Beurtheilung des Reliefs der Nadelreihen haben sollte. War die Reihe der Nadeln bei dieser Stellung senkrecht gegen die Blickrichtung, so war die Wahrnehmung, ob sie einen Bogen oder eine gerade Linie bildeten, merklich schwieriger. Am günstigsten war es also immer, wenn die Richtung der Nadelreihe der Richtung der Tangente des Horopterkreises entsprach [1].

Es ist bei diesem Versuche zu bemerken, dass man die Nadeln nicht zu weit auseinander rücken darf, weil sonst die erwähnte Täuschung eintritt, vermöge deren wir einen gegen uns concaven horizontalen Bogen für gerade zu halten geneigt sind. Bei den oben angegebenen Entfernungen der Nadeln würde die Tiefe des Bogens, der als gerade Linie erscheint, für die meisten Augen weniger als 0,1 Millimeter betragen, also viel kleiner sein als die wahrnehmbaren Verrückungen [2]. Und auch bei solchen grösseren Entfernungen der Nadeln, wo die Täuschung sichtbar werden sollte, wird man finden, dass der Spielraum zwischen den Verschiebungen, welche einen anscheinend concaven und convexen Bogen vortäuschen, sehr viel kleiner ist, wenn die Reihe der Nadeln der Richtung des Horopterkreises sich anschliesst, als wenn sie mit ihr einen Winkel bildet.

Wenn wir geradeaus nach einem Punkt des Horizonts blicken, ist der Horopter eine unterhalb der Visirebene liegende horizontale Ebene, welche bei normalsichtigen Augen meist ganz oder nahehin mit der Fussbodenfläche des stehenden Beobachters zusammenzufallen scheint. Wenn wir einen Punkt in der Medianlinie der Fussbodenebene fixiren, so ist zwar nicht die ganze Ebene

---

[1] Der Sinn dieses Versuchs ist von Herrn E. Hering in seiner Kritik gänzlich missverstanden worden.

[2] Dass ich in meiner früheren Arbeit angegeben habe: ein Bogen, dessen Krümmung etwa der des Horopterkreises entspricht, erscheine gerade, beruhte auf Messungen bei zu kleinen Distanzen der Nadeln; der Bogen ist in der That beträchtlich flacher, als der des Horopterkreises.

Horopter, aber die gerade Horopterlinie liegt auch dann doch ganz in der Fussbodenebene. An der Fussbodenebene beobachte ich nun entsprechende Erscheinungen, welche schliessen lassen, dass auch in diesem Falle die Beurtheilung des Reliefs der Fussbodenebene besonders genau ist, weil sie Horopterfläche ist. Um dies zu prüfen, betrachte man, auf ebenem Felde stehend, zunächst das Relief der Bodenfläche in gewöhnlicher Weise. Man sieht diese Fläche mit ihren kleinen Wölbungen und Senkungen deutlich horizontal bis in ziemlich grosse Entfernungen. Nun sehe man nach derselben Fläche entweder mit seitwärts geneigtem Kopfe unter dem Arme durch, oder mit abwärts geneigtem Kopfe zwischen den Beinen, wobei man aber auf einen Stein oder Erdhügel steigt, so dass die Höhe des Kopfes über der horizontalen Fläche nicht merklich geändert wird. Man wird nun die ferneren Theile der Bodenfläche nicht mehr horizontal, sondern wie eine auf die Himmelsfläche gemalte Wand sehen. Ich habe viele solche Beobachtungen auf der von Heidelberg nach Mannheim führenden Strasse angestellt. Vor mir lag hinter einer Reihe von Feldern der Neckar, der einen Einschnitt in das ebene Terrain macht, jenseits wieder ebenes Land, welches sich etwa eine Meile weit bis an den Oelberg bei Schriesheim ausdehnt. Bei aufrechter Haltung des Kopfes erkannte ich vollkommen gut die weitgedehnte Ebene jenseits des Flusses; bei schräger oder verkehrter Haltung schien das Terrain vom Flusse aus unmittelbar zu dem Oelberg in die Höhe zu steigen. Eine Hecke, die durch ein Stück Feld von einem dahinter liegenden Hause getrennt war, was ebenfalls bei aufrechtem Kopfe deutlich zu sehen war, schien bei schräger Haltung ganz nahe vor dem Hause zu liegen, und so weiter. Auch die kleinen Unebenheiten der Strasse waren mir bei natürlicher Kopfhaltung viel plastischer.

Alle diese Erscheinungen treten ebenso ein, wenn man, statt den Kopf umzudrehen, das Bild umkehrt. Am vortheilhaftesten sind dazu rechtwinkelige Prismen zu verwenden mit horizontal liegender Hypotenusenfläche, durch welche man, wie oben Seite 476 erörtert ist, die vorliegenden Gegenstände verkehrt sieht. Ich klebte zwei solche Prismen in der Entfernung meiner beiden Augen von einander entfernt, auf ein ebenes Brettchen und beobachtete durch sie die Landschaft. Das stereoskopische Relief der Bodenfläche schwand hierbei ebenso, wie beim Sehen zwischen den Füssen durch. Andererseits sieht man durch sie zuweilen das Relief niedrig liegender Wolken besser als mit blossen Augen, weil die Wolken, durch die Prismen gesehen, in Richtung des Fussbodens zu liegen kommen.

Wenn man endlich mit verkehrtem Kopfe zwischen den Beinen hindurch und gleichzeitig durch die umkehrenden Prismen die Landschaft betrachtet, so hat man wieder das deutliche Relief der Bodenfläche wie beim natürlichen Sehen. In diesem Falle ist das Spiegelbild der Bodenfläche wieder im Horopter der umgekehrten Augen. Dieser letzte Versuch zeigt, dass nicht die ungewöhnliche Stellung des Kopfes an sich, noch die ungewohnte Richtung des Bildes an der mangelhaften Genauigkeit der Tiefenwahrnehmung Schuld sind, sondern die verkehrte Lage des Bildes gegen die Augen.

46 *

Hiermit stimmt es ferner überein, dass Herr E. Hering [1], dessen Augen eine sehr geringe Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane haben, erklärt, dass er die ferneren Theile der Fussbodenfläche mit zwei Augen nicht anders als bei monocularer Betrachtung sehe.

Wie wesentlich die richtige Wahrnehmung des Reliefs der Bodenfläche beim Gehen ist, ist ersichtlich. Meistens gehen wir vorwärts, ohne die Bodenfläche direct anzusehen, und bleiben doch genügend unterrichtet über die kleinen Unebenheiten ihrer Form. Wie sehr selbst eine ganz kleine scheinbare Verschiebung des Bildes der Bodenfläche stören kann, habe ich neuerdings noch vielfältig erfahren. Wegen eines geringen Grades von Kurzsichtigkeit trug ich bei einer Gebirgsreise eine Concavbrille (Nasenklemmer) mit ganz schwachen Gläsern (36 Zoll Brennweite), um die Fernsichten besser zu sehen. Die Gläser habe ich so abschleifen lassen, dass ihre optischen Centra gleich weit von einander stehen, wie meine Augen, so dass ferne Objecte, durch die Centra der Brille gesehen, keine sichtliche Tiefenverschiebung erleiden, wie dies geschieht, wenn die Centra der Gläser einander zu nahe stehen. Dennoch ist eine kleine Verschiebung der durch die unteren Theile der Gläser gesehenen Objecte da, weil die Axen der beiden Gläser durch die sie verbindende Feder nicht ganz genau parallel gehalten werden, und wenn ich genau auf den Fussboden achte, so scheint dieser dicht vor meinen Füssen eine kleine ansteigende Wölbung zu haben, die von einer falschen stereoskopischen Wirkung der Gläser herrührt. Obgleich dies so schwach ist, dass es nur bei aufmerksamer Betrachtung bemerkt werden kann, macht mir dieser Umstand es unmöglich, die Brille zu gebrauchen, wenn ich schnell steile steinige Gebirgswege hinabgehen will, wo es nöthig ist, den Fuss ganz sicher zu setzen, und die Zeit fehlt, jeden Stein, auf den man treten will, einzeln zu betrachten und seine Entfernung zu schätzen. Trotzdem ich durch die Brille die Steine etwas schärfer sehe, als mit blossen Augen, gehe ich sicherer ohne die Brille. Es war mir dies ein auffallender Beweis für die Genauigkeit und Schnelligkeit, mit der die eingeübte Association zwischen Sinnesempfindungen und Bewegungen eintritt.

Mit der Veränderung des Reliefs bei veränderter Kopfhaltung scheint mir auch die scheinbare Veränderung der Farben der Landschaft zusammenzuhängen, die dabei eintritt. So lange wir ihre Tiefendimensionen deutlich wahrnehmen, sind die Veränderungen der Farben der Objecte durch die zwischengelagerte Luft die natürlichen und gewohnten Attribute der Ferne, die uns daher nicht als solche auffallen. Sobald wir aber die Wirkung des Reliefs zerstören durch Umkehrung des Kopfes oder Umkehrung des Bildes und die Landschaft als ebenes Bild sehen, so wird unsere Aufmerksamkeit auf die Farben hingelenkt. Auch bei monocularer Betrachtung der Landschaft ist noch ein geringer Unterschied da, wenn man erst aufrecht und dann unter dem Arme durchsieht, der mir davon herzurühren scheint, dass der obere Theil der Netzhaut gegen das Grün des Bodens, der untere gegen das Blau des Himmels ermüdet ist, und deshalb die Farben etwas lebhafter werden, wenn sie auf neue Stellen der Netzhaut

[1] Beiträge zur Physiologie. Heft 5, S. 355. Dass mir die Fussbodenfläche nicht, wie er aus seiner Theorie schliesst, als eine verticale Ebene erscheint, brauche ich wohl kaum zu versichern.

fallen. Aber dieses eigenthümliche Heraustreten der Lufttöne an den fernen Objecten finde ich nur bei binocularer Betrachtung recht deutlich. Auch hierfür ist es charakteristisch, dass für Herrn Hering seiner Versicherung nach monoculare und binoculare Betrachtung keinen Unterschied macht.

Der Grund dieser besondern Genauigkeit des Reliefs im Horopter ist, wie auch E. Hering annimmt, in dem psychophysischen Gesetze von Fechner zu suchen. Für Gegenstände im Horopter sind die scheinbaren Entfernungen vom Fixationspunkte gleich; die kleinsten Abweichungen von der Gleichheit dieses Verhältnisses erkennen wir leicht und genau. Einer solchen entspricht eine Abweichung des betreffenden Objectpunkts vom Horopter. Wenn dagegen die Form von Objecten beurtheilt werden soll, welche nicht im Horopter liegen, so kommt es auf die Verhältnisse zwischen den Distanzen der Doppelbilder ihrer verschiedenen Punkte an und nicht mehr bloss auf die Existenz eines Unterschiedes zwischen beiden Bildern. Correspondirende Netzhautpunkte sind nach unserer Ansicht solche, deren gegenseitige Lage in der Erfahrung am häufigsten verglichen worden ist, nach der anatomischen Hypothese solche, welche einen natürlichen Zusammenhang in ihrer Localisation haben. Durch beide Voraussetzungen erklärt es sich, dass die Vergleichung correspondirender oder nahehin correspondirender Netzhautbilder besser und sicherer geschieht als die von disparaten.

Wir pflegen deshalb auch unwillkührlich Objecte, die wir genau und bequem sehen wollen, möglichst in den Horopter zu bringen. Wenn man bei möglichst bequemer Haltung des Buches, in dem man liest, schwach divergirende Doppelbilder der verticalen Linien bildet, findet man sie einander parallel, die verticale Horopterlinie fällt also in die Ebene des Papiers. Für solche Augen, die der Betrachtung ferner Objecte angepasst sind, stehen dann allerdings die horizontalen Linien des Papiers nicht im Horopter. Es mag das der Grund sein, warum in der Form der europäischen Buchstaben verticale Linien so auffallend bevorzugt sind gegen die horizontalen.

Die zweite Art der Vergleichung der beiderseitigen Sehfelder ist die, wobei wir die scheinbare Vertheilung der Objecte im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde beachten und die Doppelbilder wahrzunehmen suchen. Ich habe schon oben angeführt, dass die Erkennung der Doppelbilder im Allgemeinen nur in der Mitte der Sehfelder gut geschieht und in deren peripherischen Theilen sehr grobe Ungenauigkeiten zeigt. Der wichtigste Umstand aber, welcher die Wahrnehmungen der verschiedenen Lage zweier Halbbilder eines und desselben Objects verhindert, ist die Vorstellung von der Einheit dieses ihres Objects. Wenn, wie wir wahrscheinlich zu machen gesucht haben, die Abmessungen der Sehfelder auf einer eingeübten Schätzung durch das Augenmaass beruhen, so beruht auch die Wahrnehmung der Doppelbilder auf Augenmaass und kann wie alle Schätzungen durch Augenmaass ausserordentlich weit irre geführt werden durch allerlei psychische Einflüsse, namentlich durch solche, welche uns die, sei es wahre, sei es falsche Vorstellung aufdrängen, dass die beiden Bilder einem und demselben Objecte angehören. Am schwersten bemerken wir daher die Verschiedenheit der beiden Bilder wirklicher körperlicher Objecte, wenn dieselbe

nicht sehr gross und auffallend ist; daher denn auch die meisten Laien das Phänomen der Doppelbilder gar nicht kennen, obgleich sie solche fast fortdauernd in ihrem Gesichtsfelde gehabt haben müssen. Schwer trennen wir auch Doppelbilder von Linien gleicher Färbung und Helligkeit, wenn dieselben so gezogen sind, dass ihre Deutung als Bilder einer und derselben objectiven Linie sehr nahe liegt. Am meisten erschwert aber wird die Wahrnehmung der Doppelbilder durch die Augenbewegungen. Bei der Betrachtung eines Objectes fixiren wir nach einander verschiedene Punkte seiner Oberfläche, sodass die Netzhautgruben fortdauernd von correspondirenden Bildern getroffen werden. Diese Theile der Bilder werden zugleich am deutlichsten wahrgenommen und fesseln unsere Aufmerksamkeit am meisten. So wie unsere Aufmerksamkeit sich einem seitlich gelegenen Punkte des Objects zuzuwenden beginnt, welcher vielleicht in Doppelbildern erscheint, so gleiten unsere Augen fast unwillkührlich zu seiner Fixation über, was wir nur durch besonders dahin gerichtete Aufmerksamkeit und Willensanstrengung hindern können.

Will man also Doppelbilder möglichst gut erkennen, so muss man erstens Augenbewegungen vermeiden und einen bestimmten, wohl bezeichneten Fixationspunkt festhalten. Zweitens ist es vortheilhaft, den zu unterscheidenden Bildern verschiedene Farbe oder Helligkeit zu geben, was ihre Deutung als Bilder desselben Objects erschwert oder unmöglich macht. Drittens kann man oft allerlei andere Ungleichheiten der Bilder durch theilweise Verdeckung, durch Hinzufügung ungleicher Merkzeichen hervorbringen, um die Aufmerksamkeit des Beobachters auf ihre Verschiedenheit hinzulenken, und dadurch die Unterscheidung der Doppelbilder zu einer ziemlich grossen Feinheit treiben.

Methoden, mittels deren man den genannten Schwierigkeiten aus dem Wege gehen und möglichst genaue Vergleichungen der scheinbar gleichen Abmessungen in beiden Sehfeldern erhalten kann, sind oben bei der Aufgabe, die Lage der correspondirenden Punkte und Linien zu suchen, beschrieben worden. Aber auch wenn man die besten Methoden anwendet, ist die Vergleichung correspondirender Raumgrössen der beiden Gesichtsfelder merklich unvollkommener, als die entsprechender Raumgrössen in demselben Felde.

Um bestimmte Zahlen hierfür zu gewinnen, sind die oben beschriebenen Versuche von Volkmann sehr geeignet. Bei denen, welche nach dem Schema der *Fig. 205* angestellt und auf Seite 706 beschrieben sind, verglich er die verticalen Abstände zwischen je zwei Paaren von Horizontallinien, von denen das eine Paar im rechten Sehfelde rechts von der Mittellinie, das andere im linken Sehfelde links von der Mittellinie lag. Im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde schienen beide Paare in der Mittellinie zusammenzustossen. Das eine Paar der Linien hatte einen festen Abstand von 5,5 Millimeter von einander. Im Mittel von je 30 Beobachtungen solcher Art, wobei Volkmann den Abstand des zweiten beweglichen Paars dem des andern gleich zu machen versuchte, gewann er zwar sehr gut stimmende Mittelwerthe, die nur um 0,01 und 0,03 Millimeter von dem richtigen Werthe abwichen. Sieht man aber die einzelnen Beobachtungen an, so findet man, dass er in der ersten Reihe (bewegliche Horizontale rechts) einmal den Abstand 6,0, und dann wieder 5,0 mit 5,5 für identisch

hielt, und in der zweiten Reihe kommt wieder 5,0 und 5,85 unter den Einzelbeobachtungen vor. In anderen Reihen, wo die Linien vertical gezogen waren, kommt 5,55 und 4,75 vor als gleich mit 5,2, und dann wieder 5,55 und 4,85 als gleich mit 5,2.

Es würde nun allerdings ganz unmöglich sein, wenn man die beiden Linienpaare in demselben Sehfelde neben einander liegend und an einander anstossend erblickte, so grosse Fehler zu machen. Die Schwierigkeit bei der binocularen Vergleichung scheint mir hauptsächlich ihren Grund darin zu finden, dass die Fixation schwer ganz fest gehalten wird, und die beiden Sehfelder deshalb fortdauernde kleine Schwankungen in Bezug auf die Art, wie sie sich decken, zu machen pflegen. Um dies zu prüfen, habe ich auf ein Papierblatt zwei parallele Linien in 5,5 Millimeter Abstand gezeichnet, die bis zum Rande reichen, auf einem zweiten zwei schwach convergirende, die am einen Ende 4,5, am andern 6,5 Millimeter von einander entfernt sind, und nun das erste Blatt auf das zweite gelegt, so dass das convergirende Linienpaar zum Theil sichtbar bleibt und als Fortsetzung des parallelen Paars erscheint. Während ich nun das obere Blatt fortdauernd ein wenig hin und herbewegte und dadurch die Schwankungen der Sehfelder nachmachte, suchte ich mit einem Auge zu ermitteln, ob die convergirenden Linien, wo sie am Rande des Papierblatts hervorkommen, gleich weit von einander abstanden, wie die parallelen. Hierbei wurden also beide Linienpaare in demselben Gesichtsfelde gesehen und durch die Bewegungen des einen Paars das Schwanken der Augenaxen bei der binocularen Betrachtung nachgemacht. Andererseits konnte ich das convergente Linienpaar mit einem weissen Papierblatt theilweise verdecken und es dann, soweit es sichtbar war, wie bei den Versuchen von Volkmann binocular zur Berührung mit dem Paar paralleler Linien bringen, so dass im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde beide Paare an einander stiessen und das eine als Fortsetzung des andern erschien. Diese Methode ist noch etwas vortheilhafter, als Volkmann's, bei dem je eine Linie jedes Paars ganz ausgezogen war und sich mit der correspondirenden deckte, während bei meinen Versuchen, wie bei dem auf Seite 711 beschriebenen und nach dem Schema der *Fig. 205* angestellten Versuche, gar keine Deckung, sondern nur scheinbare Fortsetzung je zweier Linien vorkam. Abweichungen in den Abständen beider Linienpaare von $1/2$ Millimeter wurden immer gleich erkannt, solche von $1/4$ Millimeter kaum übersehen. Dabei stellte sich heraus, dass ich die binoculare Vergleichung der correspondirenden Abstände ziemlich eben so gut vollzog, als die monoculare derselben Abstände in dem gleichen Sehfelde, wenn ich im letzteren Falle durch fortdauerndes Hin- und Herbewegen der einen Zeichnung das Schwanken der beiden Sehfelder gegen einander nachahmte.

Auffallend gross sind auch die einzelnen Fehler in den Versuchen, wo Volkmann die Richtung einer Linie in einem Sehfelde mit der einer anderen im anderen Sehfelde verglich. Es kommen hierbei Abweichungen vom Mittel im Betrage eines halben Grades sehr häufig, solche bis zu einem Grade zuweilen vor. Zwei Linien aber, die im monocularen Sehfelde unter einem Winkel von 179 Grad zusammenstossen, für eine gerade Linie zu halten, ist ganz un-

möglich, und kaum wird man bei solchen, die unter $179\frac{1}{2}$ Grad zusammenstossen, die Abweichung übersehen. Noch weniger wäre es möglich, im monocularen Felde zwei nahe neben einander hinlaufende gerade Linien, die eine Neigung von einem ganzen oder halben Grade gegen einander haben, für parallel zu halten. Dass nun solche Abweichungen bei Vergleichung beider Sehfelder übersehen werden, scheint mir nur erklärlich zu sein aus den Schwankungen in der Grösse der Raddrehungen beider Augen, die man, wie ich oben bemerkt habe, auch mittels der Nachbilder wahrnehmen kann. Dass trotz dieser Schwankungen in den einzelnen Versuchen doch die Mittelzahlen vieler Versuche ein recht genaues Resultat geben können, braucht nicht aufzufallen.

Die sehr viel grössere Genauigkeit, welche bei der Beurtheilung der Tiefendimensionen wirklicher Objecte erreicht wird, möchte sich demnach wohl grösstentheils aus dem Umstande erklären, dass wir ausserordentlich viel besser eingeübt sind, an den Contouren eines binocular gesehenen Gegenstandes von bekannter Körperform mit den Blicklinien entlang zu laufen, als eine unveränderliche Fixation bei ungleichen Bildern beider Netzhäute festzuhalten.

Ich muss in dieser Beziehung auf eine Thatsache aufmerksam machen, die ich oft beobachtet habe. Wenn ich eine schwer zu combinirende stereoskopische Zeichnung vor Augen habe, so gelingt es nur mühsam zu einander gehörige Linien und Punkte zur Deckung zu bringen, und bei jeder Augenbewegung gleiten sie wieder aus einander. So wie ich aber ein lebhaftes Anschauungsbild von der dargestellten körperlichen Form gewonnen habe, was oft wie durch einen glücklichen Einfall plötzlich auftritt, so gleite ich mit vollster Sicherheit mit beiden Augen über die Figur hin, ohne dass ihre Bilder sich wieder trennen. Mit dem Anschauungsbilde der Körperform ist auch die Regel für die Art der Bewegung der Blicklinien bei der Betrachtung des Körpers gegeben, ja es kann, wie ich glaube, mit Recht die Frage aufgeworfen werden, ob denn das Gesichtsanschauungsbild einer Körperform überhaupt einen anderen reellen Inhalt hat, als den, diese Regel für die Bewegungen der Augen zu sein. Wenigstens müssen wir diese Frage verneinen, wenn wir die Ausmessung der Sehfelder aus den bei den Augenbewegungen gemachten Erfahrungen herleiten.

Wir wollen uns jetzt zur Untersuchung derjenigen Umstände wenden, durch welche die Genauigkeit in der Vergleichung beider Sehfelder beschränkt wird, wo also theils Bilder, die auf nicht correspondirenden Punkten beider Netzhäute abgebildet sind, zusammenzufallen, theils solche, die auf correspondirenden abgebildet sind, verschiedene Stellung im Gesichtsfelde einzunehmen scheinen.

Der Hauptgrund für die Verschmelzung der Bilder disparater Netzhautpunkte ist die Aehnlichkeit, welche sie mit den beiden perspectivischen Bildern eines und desselben Objects haben. Je vollkommener eine solche Aehnlichkeit ist, desto schwerer wird es uns, uns loszumachen von der Vorstellung des einen räumlichen Objects und die Anordnung und gegenseitige Entfernung der einzelnen gesehenen Linien und Punkte im Sehfelde unabhängig von jener Anschauung zu vergleichen.

Betrachten wir zum Beispiel die beiden senkrechten Linienpaare der

Fig. E, Taf. VII, so dass wir die rechte Linie des rechten Paares mit dem rechten, die rechte Linie des linken Paares mit dem linken Auge fixiren, so erscheinen uns in dem Gesammtbilde zwei Linien, von denen die rechte etwas tiefer zurückliegt, als die linke. Die beiden Bilder der linken Linie können dabei nicht auf correspondirende Netzhautstellen fallen, weil die beiden Linien des rechten Paares 3,5 Millimeter von einander entfernt sind, die des linken nur 2,7, also 0,8 Millimeter weniger. Dessen ungeachtet finde ich es fast unmöglich, zu erkennen, dass die eine oder andere der beiden scheinbar schräg hinter einander stehenden Linien in einem Doppelbilde erscheint. Nur bei sehr anhaltend strenger Fixation der einen Linie sehe ich Andeutungen davon auftauchen. Es wird vielleicht einzelne Beobachter geben, welche auch in diesem Falle die Doppelbilder leicht sehen, andere, denen es gar nicht gelingt; denn es zeigen sich in dieser Beziehung sehr grosse individuelle Unterschiede.

Bei den beiden Linienpaaren *H Taf. VII* ist der Unterschied der Entfernungen grösser (3,7 und 7 Millimeter, Unterschied 3,3 Millimeter). Bringe ich sie zur Deckung, so gelingt es mir auch diese als ein weit hinter einander liegendes Linienpaar zu sehen, aber die Doppelbilder der einen oder auch wohl beider Linien verschwinden mir dabei niemals ganz, weil ihr Abstand jetzt verhältnissmässig zu gross ist.

In der *Fig. J* haben die beiden senkrechten Linienpaare ebenfalls ziemlich verschiedene Abstände (6,7 und 9,2 Millimeter, Unterschied 2,5 Millimeter), doch ist der Unterschied ihrer Abstände geringer, als in den Linienpaaren *H*, und durch die oberen und unteren Begrenzungslinien, welche das perspectivische Bild einer rechteckigen Tafel herstellen, ist die Verschmelzung erleichtert. Bei dieser Figur ist für mich der Unterschied gerade hinreichend, dass ich leicht und vollständig die stereoskopische Vereinigung vollziehe, und andererseits doch auch mit geringer Anstrengung der Aufmerksamkeit die vorhandenen Doppelbilder erkennen kann. Fixire ich im letzteren Falle eine der senkrechten Linien, so erscheint mir die andere im Doppelbilde, und zwar sehe ich die kürzere rechte Linie des Gesammtbildes leichter doppelt als die längere linke. Fixire ich die rechte Linie des Gesammtbildes und vermehre ganz langsam die Convergenz der Augen, indem ich sehr vorsichtig und leise die betreffende Muskelanstrengung, die ich aus langer Uebung kenne, eintreten lasse, so kann ich die rechte Linie des Gesammtbildes in Doppelbilder von sehr geringem Abstand (etwa 1 bis 1$\frac{1}{2}$ Millimeter) aus einander treiben, wobei auch die linke Verticale in Doppelbildern erscheinen muss, was mir auch für Augenblicke zu erkennen gelingt. Doch ist es sehr schwer, eine solche Augenstellung ohne bestimmtes Fixationsobject für einige Zeit festzuhalten, und das fortdauernde Schwanken der Blicklinien verräth sich durch das entsprechende Schwanken des Abstandes der beiden Doppelbilder der rechten Linie. Leichter gelingt es mir, an der *Fig. H* den Blick so festzuhalten, dass das linke Linienpaar ganz innerhalb des rechten erscheint und alle vier Linien einzeln gesehen werden.

Hat der Beobachter also seine Augenbewegungen hinreichend in seiner Gewalt, so kann er die beiden Bilder willkührlich in jeder beliebigen Lage zum Decken bringen und auch im Allgemeinen in jeder Lage die Doppel-

bilder erkennen, vorausgesetzt, dass diese nicht allzu nahe neben einander liegen.

Ich bin mir auch wohl bewusst, welche Art von Willensintention ich anwenden muss, um die Doppelbilder entweder zu sehen, oder nicht zu sehen. Will ich sie nicht sehen, so suche ich durch den Blick abzumessen, wie viel die rechte Linie der *Fig. E*, *H* oder *J* mehr von mir entfernt ist, als die linke, ich wende also meine Aufmerksamkeit den Tiefendimensionen zu. Will ich die Doppelbilder sehen, so suche ich zu beurtheilen, welche Form das Gesammtbild als gezeichnete Figur in der Ebene des Papiers hat, wie gross etwa der horizontale Abstand der verticalen Linien nach der Ebene des Papiers gemessen sei, und ähnliches. Es erscheint mir dies durchaus als ein ähnlicher Unterschied, wie er bei der Beurtheilung der Form der Flächen eines Cubus zum Beispiel vorkommt, den ich in irgend einer schrägen Stellung vor mir habe. Ich kann mir den Cubus einmal darauf ansehen, ob seine Flächen wirklich rechtwinkelig seien, und seine Kanten gleich lang, was sich bis zu einem gewissen Grade der Genauigkeit ja auch bei einer schiefen Ansicht desselben erkennen lässt. Oder ich kann den Cubus zeichnen wollen und mir seine Flächen darauf ansehen, wie sie als Parallelogramme im Sehfelde erscheinen. Dann werde ich darauf achten, um wie viel grösser die stumpf erscheinenden Winkel aussehen, als die spitz erscheinenden, wie viel grösser die eine Diagonale seiner Flächen erscheint als die andere, und so fort. Mit beiden Anschauungsweisen kann ich nach Willkühr wechseln. Sind die Flächen perspectivisch sehr verzogen, so werde ich, während ich deutlich wahrnehme, dass die Winkel der Begrenzungsflächen alle gleich und alle Rechte sind, doch nicht ganz übersehen können, dass die drei um eine Ecke herum gelagerten Rechten im Bilde gleich vier Rechten erscheinen, und überhaupt, dass die verschiedenen rechten Winkel verschieden gross erscheinen. Wenn aber die Ansicht nur wenig schief ist, werde ich vielleicht auch bei der grössten Aufmerksamkeit und Uebung nicht erkennen können, dass die Winkel im Sehfelde verschieden gross erscheinen; so zum Beispiel, wenn mein Auge sich in der Verlängerung einer der Kanten befindet, und ich also überhaupt nur eine Fläche des Cubus und diese mit geringer Neigung gegen die Blicklinie vor mir habe. Ueberhaupt sind wir viel mehr geübt, die wahre körperliche Form, als die Erscheinung im Gesichtsfelde richtig abzuschätzen, worin eine Hauptschwierigkeit des Zeichnens nach Körpern besteht.

Genau so verhält es sich mit den Tiefenanschauungen im Gesichtsfelde und mit den Doppelbildern. Ich wende meine Aufmerksamkeit den Tiefendimensionen zu; dann sind die verschiedenen Entfernungen entsprechender Bildpunkte in den beiden Netzhautbildern das erfahrungsmässige sinnliche Zeichen für ein und dieselbe räumliche Dimension des äussern Objects, und ihre Verschiedenheit drängt sich der Aufmerksamkeit des Beobachters nur dann auf, wenn sie sehr gross ist; wie die scheinbar rhomboidische Gestalt der Flächen des Würfels nicht ganz vergessen werden kann, trotz der richtigen gleichzeitigen Wahrnehmung ihrer wirklichen quadratischen Gestalt, wenn die perspectivischen Verziehungen sehr gross sind.

Dann aber wieder kann ich meine Aufmerksamkeit der Erscheinung im Gesichtsfelde zuwenden, und werde nun Verschiedenheiten der beiden Bilder bemerken können, die ich vorher übersah; dabei wird sich aber die Wahrnehmung der Tiefendimension ebenso aufdrängen können und mich verleiten, sehr kleine Verschiedenheiten der beiden Ansichten des Körpers zu übersehen, wie die Wahrnehmung der wirklichen Gestalt des Würfels mich vollständig hindern kann sehr kleine perspectivische Verziehungen seiner Flächen zu erkennen. Im einen, wie im andern Falle handelt es sich darum, die Verschiedenheit gewisser Raumgrössen im Gesichtsfelde zu erkennen, welche wir erfahrungsmässig als den sinnlichen Ausdruck gleicher Grössen im objectiven Raume kennen, nur dass einmal die beiden zu vergleichenden Grössen in den beiden verschiedenen Sehfeldern liegen, im anderen Falle beide in demselben Gesichtsfelde.

Wenn ich übrigens in den *Fig. H* und *J* die Tiefendimensionen zur Anschauung zu bringen suche, so gelingt dies am besten, wenn ich den Blick vom einen zum anderen Ende der Tiefendistanz wandern lasse. Aber es gelingt auch, wenn gleich weniger lebhaft bei festgehaltenem Blicke, und zwar finde ich an den von Zeit zu Zeit auftauchenden Doppelbildern, dass ich dann so fixire, dass die Mitte der linken Figur auf die Mitte der rechten fällt und beide Verticallinien des Gesammtbildes in Doppelbildern erscheinen. Es ist dies die Stellung, welche die geringsten Distanzen sämmtlicher Doppelbilder giebt.

Uebrigens wird das Sehen der Doppelbilder erleichtert, wenn man irgend welche, oft selbst sehr unbedeutende Incongruenzen in den beiden zu vereinigenden Bildern anbringt, welche der Deutung, als gehörten sie beide ein und demselben räumlichen Objecte an, widersprechen. So braucht man, wie VOLKMANN gezeigt hat, in der *Fig. E* nur eine Hälfte einer der Linien mit einem weissen Blatte zu verdecken, oder zwei Horizontallinien in verschiedener Höhe in den Zwischenräumen der beiden Paare von Verticallinien zu ziehen, so dass sich *H* ähnliche Figuren bilden, deren Querstriche aber verschieden hoch liegen. Oder man mache, wie in *Fig. P, Taf. IX* das eine Linienpaar schwarz auf weissem Grunde, das andere weiss auf schwarzem Grunde, wodurch die stereoskopische Vereinigung erschwert, wenn auch nicht unmöglich gemacht wird. In *Fig. G, Taf. VII* sind die Linienpaare der *Fig. E* copirt und nur zwei Punkte hinzugefügt, welche gleiche Entfernung von der links liegenden Linie jedes Paares haben, wobei aber der eine innerhalb, der andere ausserhalb der rechten Linie fällt. Vereinigt man die beiden Punkte, indem man sie fixirt, so erscheinen die daneben liegenden beiden Linien sogleich getrennt, denn da die eine rechts, die andere links von dem fixirten Punkte sich befindet, so ist dies ein viel auffallenderer Unterschied, als wenn sie beide an derselben Seite des Fixationspunktes, und nur verschieden weit entfernt lägen. Aber auch, wenn man nicht den Punkt, sondern die linke Linie des Gesammtbildes fixirt, erscheint der Punkt einfach, während die scheinbar hinter ihm durchgehende rechte Linie jetzt ziemlich leicht als doppelt erkannt wird. Es drängt sich hier die Wahrnehmung auf, dass die rechte Linie der linken ein Mal näher als der Punkt erscheint, und ein Mal ferner, und wir erkennen nun, dass der Punkt beide Male gleich weit von der linken Linie ent-

fernt ist, die rechte Linie aber ungleich weit. Dabei tritt durch eine Art Contrastwirkung der Punkt, der in der Ebene des Papiers erscheinen sollte, vor dieselbe hinaus, als wäre er im rechten Bilde der linken Linie etwas näher, im linken ferner.

Die Verschmelzung kann auch erfolgen zwischen Punkten, die etwas verschiedene Höhe über oder unter dem Netzhauthorizonte haben, z. B. wenn man die beiden Linienpaare der *Fig. F, Taf. VII* zum Decken bringt, von denen das linke 3, das rechte 3,7 Millimeter Abstand hat. Bei der Betrachtung reeller Objecte findet dieser Fall seine Analogie, wenn man zwei Horizontallinien, die seitlich von der Medianebene gelegen sind, vor Augen hat. Diese sind dann dem einen Auge näher als dem anderen, und ihr Abstand erscheint ersterem grösser als letzterem. Aber die Unterschiede in den verticalen Abständen, welche bei der Betrachtung reeller Objecte vorkommen, pflegen verhältnissmässig klein zu sein gegen diejenigen, welche zwischen den horizontalen Abständen vorkommen. Damit scheint es zusammenzuhängen, dass nur solche Bilder verschmelzen, deren verticale Dimensionen sehr geringe Verschiedenheit haben. Auch löst sich die Verschmelzung dieser Linienpaare *F* sowohl, als auch selbst solcher, deren Abstände noch viel weniger verschieden sind, ziemlich bald bei anhaltender fester Fixirung.

Es ist ferner hervorzuheben, dass nicht bloss auf den seitlich von der Netzhautgrube gelegenen Theilen der Netzhäute disparate Bilder verschmelzen können, sondern selbst solche, die dicht bei und auf dem Centrum der Netzhautgrube liegen. Wenn ich die beiden Kreuze der *Fig. L, Taf. VIII* zum Decken bringe und den Mittelpunkt des Gesammtbildes fixire, müssen die beiden nach rechts von den Kreuzen gelegenen Verticallinien in eine scheinbar continuirlich fortlaufende Linie verschmelzen. Das ist auch der Fall, wenn ich sehr sorgfältig und genau die Mitte des Kreuzes fixire, aber durchaus nicht immer, wenn ich auf das Fixiren nicht besonders achte; sondern bald scheint die obere, bald die untere Verticallinie weiter vom Kreuze entfernt zu sein, so dass der gegenseitige Abstand der beiden halben Verticallinien wohl bis zu einem Millimeter oder selbst mehr beträgt, ohne dass dabei erkennbare Doppelbilder der Verticalen des Kreuzes auftreten. Betrachte ich zuerst das Blatt selbst, also in Convergenzstellung, und treibe nun die Augen aus einander, bis die Kreuze auf einander fallen, so bleibt der obere Theil der seitlichen Verticalen, der dem rechten Bilde angehört, gewöhnlich der entferntere. Es bleibt also etwas zu viel Convergenz der Augenstellung bestehen. Aber ich kann absichtlich auch die Augen noch etwas weiter aus einander treiben (was für mich immer noch Convergenzstellung ist, da der Abstand meiner Augen 66 Millimeter und der der Zeichnungen nur 63,5 beträgt); dann tritt die obere Hälfte der Verticallinie dem Kreuze näher als die untere. In diesem Falle verrathen die Schwankungen der leicht vergleichbaren seitlichen Verticallinien, dass Schwankungen der Augenstellung da sind, die sich nicht durch Doppelbilder der scheinbar fixirten Verticallinie des Kreuzes verrathen. Es ist dies ein Umstand, der bei Versuchen über Doppelbilder wohl zu beachten ist. Man darf nicht glauben, dass bei gewöhnlicher, nicht sehr genauer Fixation eines Punktes dieser immer auf

genau correspondirenden Punkten der Netzhautcentren abgebildet ist. So finde ich auch, dass ich die Figuren *E* und *F* immer so fixire, dass das engere Linienpaar ganz innerhalb des weiteren fällt. Um dies zu sehen, brauche ich nur von einem Ende her die Hälfte des einen Linienpaars mit einem weissen Blatte zu verdecken.

Ich hatte eine ähnliche Figur wie *L* erst gebrauchen wollen, um die Grösse der correspondirenden Strecken auf der Horizontallinie zu bestimmen, fand sie aber für mich dazu ganz unbrauchbar, weil die Verticale des Kreuzes mir auch bei ziemlich grossen Verschiebungen der seitlichen Verticalen immer noch einfach erschien. Dagegen gelang der Versuch viel besser, wenn ich auch von der Verticale des Kreuzes in der einen Figur die obere, in der andern die untere Hälfte wegliess.

Es kann auch eine Verticale des einen Bildes mit zwei ihr nahehin correspondirenden des andern verschmelzen. In *Fig. T, Taf. X* sind links zwei, rechts drei Linien. Bringt man die rechts liegende Linie beider Gruppen zum genauen Decken, so fällt das Bild der einen linken Linie der linken Gruppe mitten zwischen die beiden linken Linien der rechten Gruppe hinein und verschmilzt mit diesen. Es entsteht dabei der Eindruck eines Gesammtbildes von drei Linien, deren äusserste linke dem Beobachter näher, die dicht daneben liegende zweite dem Beobachter ferner ist, als die rechte Linie. Die drei Linien scheinen ein rechtwinkeliges Prisma zu begrenzen; sie sind auch der richtige optische Ausdruck eines solchen, dessen eine Fläche verlängert durch das linke Auge des Beobachters geht. Um zu erkennen, wo das Bild der einfachen linken Linie liegt, ist deren Mitte mit einem stärkeren Punkte bezeichnet. Fixire ich die rechte Linie des Gesammtbildes, so fällt dieser Punkt bald auf die eine, bald auf die andere Linie des entsprechenden Linienpaares, bald mitten hinein. Das verräth Schwankungen der Convergenz.

So kann auch ein Kreis mit einem anderen verschmelzen, der etwas grösser oder etwas kleiner ist, wie die Kreise der *Fig. R, Taf. X*. Es entspricht das dem reellen Falle, wo der Beobachter einen seitlich von seiner Medianebene gelegenen Kreis (oder Kugel) betrachtet, der dem einen Auge näher ist, als dem anderen. Dabei sind die vertical verlaufenden Theile beider Kreise leicht und ziemlich dauernd zu verschmelzen, die horizontal verlaufenden Bogenstücke trennen sich dagegen leicht, wenn der Unterschied der Radien beider Kreise nicht relativ sehr klein ist. Der Fixationspunkt ist dabei im Centrum des Gesammtbildes angenommen. Zu beachten ist bei diesem Versuche, dass ich mich dabei ertappte, wie ich, ohne es zu wissen, den Kopf nach der Seite des grösseren Kreises hingewendet hatte, wodurch die scheinbare Grösse beider Kreise nahehin gleich wurde. Da gelang natürlich die Verschmelzung sehr viel vollständiger. Wenn man dagegen einen Kreis mit zwei anderen zu verschmelzen sucht, von denen der eine etwas kleiner, der andere etwas grösser ist, als jener, wie in *Fig. S, Taf. X*, so findet die Verschmelzung an den nahe senkrecht verlaufenden Theilen der Kreise allerdings statt, und zwar meist so, dass der einfache Kreis an einer Seite mit dem grösseren, an der anderen Seite mit dem kleineren zusammenfällt. Oben und unten dagegen trennen sich die Kreise

und man sieht Bogen des einfachen Kreises vom grossen zum kleinen hinüberlaufen. Man sieht also im Gesammtbilde zwei Kreise, zwischen denen oben und unten allerdings in einer gewissen verwirrten und nicht recht deutlichen Weise noch je ein verbindender Bogen herüberläuft. Der innere Kreis erscheint rechts hinter, links vor dem äusseren zu liegen, vermöge einer ähnlichen stereoskopischen Wirkung wie bei den Verticalen der *Fig. T*, *Taf. X.* Auch hier tritt die Verschmelzung ein, soweit in den combinirten Zeichnungen eine Aehnlichkeit mit reellen Objecten gefunden werden kann; wo diese fehlt, trennen sie sich.

Volkmann [1] hat eine Reihe von Messungen angestellt über die Grenzwerthe der Differenzen, die beim stereoskopischen Sehen noch verschwinden können. Er blickte mittels eines Stereoskops nach zwei Paaren von je zwei schwarzen Linien auf weissem Grunde, die wir *ab* und *cd* nennen wollen. Eine dieser Linien *d* war ein Menschenhaar, in einem Schieber ausgespannt und mit diesem verschiebbar. Der Schieber wurde anfänglich so gestellt, dass die Linie *a* mit *c* und *b* mit *d* sich stereoskopisch vereinigte, dann wurde die bewegliche Linie *d* ihrer Nachbarin *c* so lange entweder genähert oder von ihr entfernt, bis sie sich von der mit ihr stereoskopisch vereinigten Linie *b* des andern Paares trennte. Der durch die Linsen des Stereoskops veränderte Gesichtswinkel war so gross, als würden die Linien aus 150 Millimeter Distanz betrachtet.

Wenn auch der Beobachter bei diesen Versuchen die Aufgabe hatte, die eine Linie des Gesammtbildes fest zu fixiren, so glaube ich nach meinen oben beschriebenen Erfahrungen doch annehmen zu dürfen, dass er in Wahrheit die Augen so gestellt hat, dass beide Linien in nahe gleich weit von einander entfernten Doppelbildern gesehen worden wären, falls er die letztern hätte unterscheiden können, so dass die wahren Abstände der verschmelzenden Doppelbilder nur etwa halb so gross, oder etwas mehr als halb so gross sein möchten, als die Differenzen der beiden verglichenen Abstände.

Ich lasse hier eine Uebersicht von Volkmann's Resultaten folgen, deren jedes einzelne das Mittel aus 15 Beobachtungen ist. Die Werthe der Distanz *cd* sind die äussersten, welche mit *ab* zu vereinigen waren, die Längen sind in Millimetern angegeben.

Nr.	Beobachter	*ab*	*cd*	*ab* — *cd*	Bemerkungen.
1	Volkmann	5,3	3,46 7,57	+ 1,84 — 2,27	Linien vertical
2		5,3	4,52 6,62	+ 0,78 — 1,32	ebenso, zwei Monate später
3		1,5	0,91 3,25	+ 0,59 — 1,75	ebenso
4		8,0	5,91 10,99	+ 2,09 — 2,99	ebenso
5		5,3	4,88 6,05	+ 0,42 — 0,75	Linien horizontal

[1] Archiv für Ophthalmologie. II, 2, S. 32—59.

Nr.	Beobachter	ab	cd	$ab - cd$	Bemerkungen.
6	VOLKMANN	1,5	1,15 1,97	+ 0,45 — 0,47	Linien horizontal
7		8,3	7,26 9,01	+ 1,04 — 0,71	ebenso
8	SOLGER	5,3	2,13 10,00	+ 3,17 — 4,70	Linien vertical
9		5,3	4,66 5,91	+ 0,64 — 0,61	Linien horizontal
10	KRAUSE	5,3	3,21 8,48	+ 2,09 — 3,18	Linien vertical
11		5,3	4,92 5,86	+ 0,38 — 0,56	Linien horizontal

Es zeigt sich in diesen Beobachtungen eine beträchtliche individuelle Verschiedenheit für verschiedene Beobachter, und auch bei demselben Beobachter für verschiedene Grade der Uebung.

Für Herrn VOLKMANN selbst wurden nämlich, wie die Zahlen ergeben, die Doppelbilder eher sichtbar, nachdem er zwei Monate lang ähnliche Versuche fortdauernd angestellt hatte. Dass für ihn überhaupt die Doppelbilder bei kleinern Unterschieden der Bilder schon sichtbar wurden, als für die beiden anderen Beobachter, mag sich ebenfalls daraus erklären, dass er von Anfang in physiologisch optischen Beobachtungen viel geübter war; doch ist auch wohl anzunehmen, dass überhaupt die Geschicklichkeit im Augenmaass bei verschiedenen Anwendungen desselben beträchtliche individuelle Verschiedenheiten zeigen wird. Die Zahlen zeigen ferner, dass, wie schon oben erwähnt worden ist, verticale Abweichungen in den beiden Gesichtsfeldern zwischen horizontalen Linien viel leichter erkannt werden, als horizontale; die letztern zeigen auch eine geringere Breite individueller Abweichung. Wenn man dabei berücksichtigt, dass wahrscheinlich nur die halbe Breite der angegebenen Differenzen zu nehmen ist, dass davon noch die Breite der Linien selbst mit etwa $^1/_{10}$ Millimeter abgeht, dass endlich der kleinste sichtbare Abstand in 150 Millimeter Entfernung etwa $^1/_{20}$ Millimeter beträgt, so bleibt bei einigen von den Versuchen an den Horizontallinien für die Verschmelzung in der That wenig Breite übrig. Andere Versuchsreihen von VOLKMANN zeigen, dass überhaupt bei wachsendem Winkel zwischen den Linienpaaren und der Verticallinie die zu verschmelzenden Unterschiede ihrer Abstände continuirlich kleiner werden und ihr Minimum bei horizontaler Richtung zeigen.

Weiter suchte VOLKMANN auch die grössten Unterschiede der Richtung je zweier Linien auf, welche die stereoskopische Vereinigung derselben noch zuliessen. Beide Linien waren als Durchmesser auf drehbaren Scheiben gezogen, wurden erst mit einander parallel gestellt unter dem in der Tabelle bemerkten Winkel gegen die Verticale. Dann wurde die rechte Scheibe so weit bald nach rechts, bald nach links gedreht, bis die stereoskopische Vereinigung aufhörte, die Differenz in der Richtung beider Linien ist dann als Winkelabstand angegeben.

Die Zahlen sind Mittelwerthe aus je 20 (Volkmann) oder 30 (Solger) Beobachtungen; die Länge der Linien ist mit D bezeichnet.

Winkel mit der Verticale	Winkelabstand Volkmann $D = 60$ Mm.	Volkmann $D = 20$ Mm.	Solger $D = 60$ Mm.
0°	5,5°	7,4°	17,5°
10°	5,1°	6,9°	15,5°
20°	4,4°	6,1°	14,0°
30°	3,8°	5,8°	11,5°
40°	3,7°	5,3°	10,2°
50°	3,4°	4,4°	8,9°
60°	2,7°	4,1°	6,2°
70°	2,4°	3,3°	4,5°
80°	1,9°	2,8°	3,9°
90°	1,5°	2,1°	2,9°

Es geht daraus hervor, wie nahehin verticale Linien bei viel grösseren Unterschieden ihrer Richtung mit einander verschmelzen, als nahehin horizontale, und dass auch hier beträchtliche individuelle Unterschiede vorkommen. Kürzere Linien verschmelzen leichter als längere.

Wheatstone, der Erfinder des Stereoskops, schloss aus seinen Versuchen, dass ebenso, wie disparate Bilder bei der stereoskopischen Projection in eines vereinigt werden könnten, so auch correspondirende Punkte zweier Netzhautbilder an zwei verschiedene Stellen des Raums verlegt und also doppelt gesehen werden könnten. Diese Folgerung ist vielfach bestritten worden. Wenn man sie aber nur in ihrem richtigen Sinne und ihrer nothwendigen Beschränkung auffasst, wird sie nicht wohl geleugnet werden können. Denn wenn einmal zugegeben wird, dass unter gewissen Umständen und in gewissem Sinne disparate Bilder einfach gesehen werden, so folgt nothwendig, dass unter denselben Umständen und in demselben Sinne auch correspondirende Bilder doppelt gesehen werden müssen. Es seien AC und BD *Fig. 209* zwei Flächen, A und

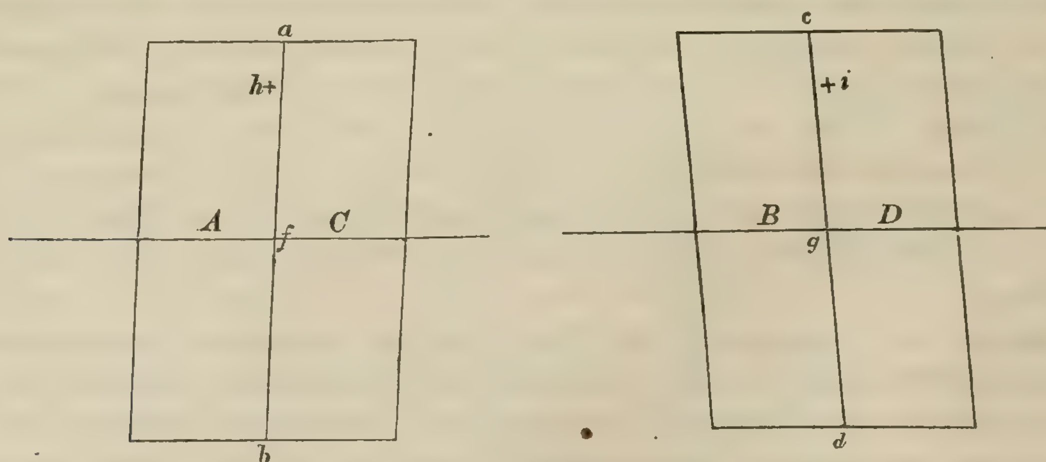


Fig. 209.

B grün, C und D roth. Sie mögen irgend welchen stereoskopischen Bildern angehören und für den Beschauer sich vereinigen in das einfache Bild einer

gegen ihn geneigten Fläche, wobei die Linie *ab* sich mit der Linie *cd* vereinigt, obgleich diese Linien in ihrer Richtung nicht genau correspondiren. Die fixirten Punkte beider Zeichnungen mögen *f* und *g* sein und senkrecht über diesen die beiden correspondirenden Punkte *h* und *i* liegen. Die letzteren werden auf verschiedenen Seiten von *ab* und *cd* liegen können, weil diese Linien der Annahme nach nicht correspondirende sind. In der Figur sind die Punkte durch Kreuzchen bezeichnet, aber nur um ihre Lage anzudeuten; es wird angenommen, dass sie sich in den stereoskopischen Bildern von dem Grunde, auf dem sie liegen, durch nichts auszeichnen. Dann wird in dem gemeinsamen Bilde der scheinbar wahrgenommenen geneigten Fläche alles Grün links, alles Roth rechts von der binocular gesehenen Grenzlinie beider Flächen gesehen, also auch nothwendig der im Grün liegende Punkt *h* links, der im Roth liegende correspondirende Punkt *i* rechts von der Grenzlinie beider Farben. Die Ordnung der Punkte in jedem einzelnen Sehfelde wird offenbar durch den gemeinschaftlichen Sehact nicht umgeändert werden können. Die beiden Punkte *h* und *i* werden dann also auf zwei verschiedenen Punkten der scheinbar vorhandenen geneigten Fläche localisirt, nicht aber auf zwei Punkte des Sehfelds; denn auf dieses wird hierbei überhaupt nicht geachtet. Aber natürlich wird das eben nur so lange geschehen, als unter dem Einfluss des körperlichen Anschauungsbildes eine genaue Vergleichung der relativen Lage von *ab* und *cd* zu den Netzhauthorizonten verhindert wird. Sobald wir unsere Aufmerksamkeit von dem scheinbar vorhandenen körperlichen Objecte ab und der Form der Bilder im Sehfelde zulenken, wird es uns bei hinreichender Uebung vielleicht gelingen, die Linien *ac* und *cd* von einander getrennt zu sehen, zwischen ihnen einen Streifen, auf dem sowohl Grün wie Roth liegt, und hier das Grün des Punktes *h* mit dem Roth des Punktes *i* zusammenfallend.

Ich bemerke hierbei noch, dass von den Vertheidigern der angeborenen Identität der Netzhautstellen angenommen wird, durch den sogenannten Wettstreit der Sehfelder würden in einem solchen Falle die Theile des andern Bildes, welche den Grenzen der farbigen Flächen entsprächen, ausgelöscht. Unmittelbar neben jeder Contour würde das Grün und Roth, was ihr anliegt, den correspondirenden gleichfarbigen rothen oder grünen Grund unterdrücken. Aber auch dies zugegeben, so würde doch die Lage der Punkte *h* und *i* so gewählt werden können, dass auf ihnen Gleichgewicht des Wettstreits stattfände, und dann würden alle unsere Einwände wieder gelten.

Die Punkte *h* und *i* dürfen übrigens nicht gleichartig bezeichnet sein in der Zeichnung, weil sie sonst die Vorstellung eines Objects, welches hinter der vereinigten Linie *ab* — *cd* läge, hervorbringen würden; dann würde also in der Raumanschauung das neben einander Liegen der Punkte und Linien nicht in Betracht kommen.

Will man solche Deckpunkte, deren Bilder getrennt erscheinen sollen, bezeichnen, so muss man sie verschieden bezeichnen. Hierfür hat Wheatstone einen viel besprochenen Versuch vorgeschlagen, bei dem in dem einen Sehfelde eine starke schwarze Linie, in dem andern mit ihr correspondirend eine ganz feine steht. Diese wird aber unter einem kleinen Winkel von einer andern

starken gekreuzt, und bei stereoskopischen Combinationen vereinigen sich scheinbar die beiden starken Linien zu einer gegen die Papierfläche geneigten Linie, während die schwache daneben in der Papierfläche erscheint. In Wheatstone's Figur sind nun allerdings die Neigungsunterschiede der beiden zu vereinigenden Linien so gross, dass die meisten Beobachter sie leicht in Doppelbildern sehen werden, wie dies auch von verschiedenen Seiten hervorgehoben ist. Wheatstone selbst gehört offenbar zu denjenigen Beobachtern, die sehr weit getrennte Doppelbilder noch übersehen können, und es muss jeder Beobachter die Neigungsunterschiede der zu vereinigenden Linien seinen Augen anpassen. Ich finde die Wirkung noch sicherer, wenn man jederseits eine starke und eine schwache Linie zieht, die sich unter einem Winkel kreuzen, so dass eine starke der schwachen der andern Seite correspondirt, wie dies in *M, Taf. VIII,* für meine Augen passend geschehen ist. Für Beobachter mit anderer Divergenz der scheinbar verticalen Meridiane würde freilich eine etwas andere Stellung der Figuren nöthig sein. In der genannten Figur hier vereinigt sich mir die starke mit der starken, die schwache mit der schwachen Linie, und es gelingt mir in keiner Weise zu sehen, dass die linke starke sich mit der rechten schwachen deckt. Nur wenn ich durch veränderte Divergenz der Augen die Bilder aus einander schiebe, sehe ich, dass die genannten beiden Linien einander vollkommen parallel erscheinen. Man muss auch nicht glauben, dass eines der Bilder beim Beschauen ganz verschwände und übersehen würde; dann könnte keine stereoskopische Wirkung da sein. Es erscheint aber das gekreuzte Linienpaar deutlich mit dem obern Ende dem Beschauer genähert, wenn man seine Lage mit den daneben gezogenen dünnen Verticallinien vergleicht. Eine solche stereoskopische Wirkung würde nicht eintreten können, wenn die rechte dünne Linie gar nicht gesehen würde.

Eine ähnliche Wirkung erhält man von der *Fig. N, Taf. VIII,* wo die beiden äusseren Grenzlinien der oberen Hälfte des schwarzen Streifens correspondiren, und ebenso ihre Fortsetzungen, die inneren Grenzlinien, der unteren Hälfte. Im Gesammtbilde sieht man einen schwarzen Streifen, und an diesem erscheinen die beiden Grenzlinien, die sich correspondiren, an entgegengesetzten Seiten. Auch in dieser Figur wird die Neigung der schwarzen Dreiecke von solchen Beobachtern, die eine andere Divergenz der verticalen Meridiane haben, etwas geändert werden müssen.

In den Beispielen *M* und *N* werden es die meisten Beobachter unmöglich finden, zu sehen, dass die sich scheinbar vereinigenden Linien im gemeinsamen Gesichtsfelde sich wirklich nicht decken, und dass im Gegentheil die rechte dünne und linke dicke Linie der Figur *M*, die entgegengesetzten Ränder der Streifen in *N* aufeinanderfallen. Ich will indessen nicht läugnen, dass bei einem in der Beobachtung von Doppelbildern recht geübten Beschauer die Beobachtung gelingen könnte. Ich selbst bemerke wohl mitunter bei recht scharfer Fixirung der Mittelpunkte, dass ich die betreffenden Linien nicht eigentlich einfach sehe, aber ohne die Doppelbilder bestimmt trennen zu können. Noch leichter trennt man sie, wenn man, wie W. v. Bezold, die Figuren mit Tusche auf einer Glasplatte ausführt, so dass man bei plötzlich geänderter Beleuchtung die eine

hell auf dunklem Grunde, die andere dunkel auf hellem Grunde sehen kann. Dann schwindet das Streben zur Verschmelzung, und man erkennt leicht die disparate Lage der Bilder. Ich will hier nur hervorheben und nur das kann ich als den wahren Sinn des WHEATSTONE'schen Versuchs betrachten, dass, so lange man in die körperliche Anschauung versenkt bleibt, selbst bei festgehaltenem Fixationspunkte, die Eindrücke correspondirender Punkte benutzt werden, um differente Theile des körperlichen Gesammtbildes auszufüllen. Wenn man sich unter Umstände versetzt, welche einen Irrthum in der Vergleichung der zwei verschiedenen Bilder beider Sehfelder möglichst begünstigen, werden Bilder disparater Punkte vereinigt und Bilder correspondirender Punkte getrennt. Das erstere kann, wie gezeigt wurde, sogar nicht ohne das andere vor sich gehen; das zweite ist eine logische Folge des ersten. Daraus folgt aber nicht, wenn man die Art der Beobachtung passend verändert, um die Vergleichung der Bilder beider Sehfelder möglichst ungestört vollziehen zu können, und sich die Bilder disparater Punkte in Folge dessen trennen, dass dann die Bilder correspondirender Punkte sich nicht wieder vereinigen sollten.

Hinzuzufügen ist noch, dass auch bei der Beleuchtung durch den elektrischen Funken die stereoskopische Combination der letzt beschriebenen Figuren *M* und *N* ganz vollkommen eintritt, und dass man dabei keine Spur von den Doppelbildern sieht, die im gemeinsamen Sehfelde erscheinen sollten, wenn die Bilder correspondirender Punkte einfach auf einander gelegt würden. Die Wirkung ist also durchaus nicht von Augenbewegungen abhängig.

Wir haben noch einige andere Umstände zu besprechen, die bei der Verschmelzung von zwei verschiedenen Netzhautbildern zu berücksichtigen sind.

Erstens ist zu bemerken, dass, so lange stereoskopische Tiefenwahrnehmung da ist, nicht, wie einige Anhänger der angeblichen Identität der Netzhäute angenommen haben, das eine der beiden Doppelbilder etwa deshalb verschwindet, weil es vollständig übersehen wird und gar nicht zur Empfindung kommt. Wenn letzteres der Fall wäre, würde keine binoculare Tiefenwahrnehmung stattfinden können, die eben nur auf der Verschiedenheit der Bilder und auf der Perception dieser Verschiedenheit beruht. Ja, die sehr grosse Genauigkeit der Tiefenwahrnehmung zeigt sogar, dass die Verschiedenheit der Bilder auch mit grosser Genauigkeit wahrgenommen wird, freilich nicht als eine Verschiedenheit in der Ausfüllung der Sehfelder, sondern nur als sinnlicher Ausdruck der verschiedenen Entfernung der Objectpunkte. Wo keine Tiefenwahrnehmung zu Stande kommt, da kommt es allerdings vor, dass einzelne Theile der Bilder zeitweise oder ganz verlöschen; wir werden diese Fälle im nächsten Paragraphen genauer zu besprechen haben.

Zweitens ist noch der Einfluss der Augenbewegungen auf die Verschmelzung der Doppelbilder zu besprechen. In dieser Beziehung hat E. BRUECKE die Meinung aufgestellt, dass wir eine Wahrnehmung der Tiefendimensionen des Objects nur dadurch bekommen, dass wir fortdauernd mit den Blicklinien an den verschiedenen Contouren des gesehenen Objects entlang laufen und hierbei nach einander alle einzelnen Punkte dieser Contouren auf den identischen Centren der Netzhautgrube abgebildet erhalten. Da nun unsere Aufmerksamkeit der

Regel nach auf die Bilder der am genauesten sehenden Stelle der Netzhaut concentrirt ist, so konnte mit Grund die Frage aufgeworfen werden, ob nicht deshalb die Doppelbilder der übrigen Theile des Objects übersehen werden, weil für gewöhnlich die am genauesten gesehenen und unsere Aufmerksamkeit am meisten fesselnden Theile der Bilder correspondirende sind. Es ist dieser Ansicht von Bruecke gegenüber zuzugeben, dass in der That die darin betonten Momente von grossem Gewicht für die Gewinnung vollständiger Tiefenanschauungen sind, und dass die von ihm gegebene Beschreibung der Art, wie sie entstehen, den Verhältnissen des gewöhnlichen unbefangenen Sehens vollkommen entspricht. Eine Vereinigung von sehr differenten Bildern gelingt in der That nur mittels der Augenbewegungen, indem man nach einander die einzelnen Theile der Bilder einfach sieht und die Aufmerksamkeit ihren natürlichen Gang gehen lässt, wobei sie immer auf diejenigen Theile vorzugsweise gerichtet ist, welche fixirt werden. Auch wird durch dieses Herumführen des Blicks die Tiefenanschauung entschieden genauer und lebendiger, als bei Fixation eines Punktes, was ich daraus erklären möchte, dass nur die Tiefenunterschiede derjenigen Bildpunkte genau erkannt werden, die dem jedesmaligen Horopter sehr nahe liegen. Dadurch also, dass man die Convergenz wechseln lässt und nach einander alle Punkte des wirklichen oder scheinbaren Objects in den Horopter oder ihm mindestens sehr nahe bringt, erhält man nach einander eine genaue Anschauung aller Tiefenunterschiede. Fixirt man den Blick längere Zeit auf einen Punkt, so treten im Gegentheil die Doppelbilder leichter hervor und die Tiefenunterschiede namentlich derjenigen Punkte, welche in sehr disparaten Doppelbildern erscheinen, werden undeutlich. Ja, die Doppelbilder, welche man durch sehr anhaltende strenge Fixation eines Punktes nicht von einander lösen kann, liegen so nahe an der Grenze der Unterscheidungsfähigkeit der Augen, dass ich glaube annehmen zu dürfen, dass sie nur wegen der unvermeidbaren kleinen Augenbewegungen nicht auch aufgelöst werden. Indessen war die von Bruecke aufgestellte Theorie etwas zu ausschliesslich, wenn er meinte, dass alle Tiefenwahrnehmungen nur durch Augenbewegungen gewonnen und alle Doppelbilder nur durch successives Einfachsehen der einzelnen Punkte beseitigt werden könnten. Es wurde nämlich von Dove gezeigt, dass auch bei instantaner Beleuchtung durch einen elektrischen Funken stereoskopische Effecte erhalten und Doppelbilder verschmolzen werden können. Es kann dazu der auf Seite 567 beschriebene Apparat gebraucht werden. Nur muss man dafür sorgen, dass im Momente der elektrischen Beleuchtung die beiden Blicklinien auf correspondirende Theile des Bildes gerichtet seien. Zu dem Ende pflege ich zwei feine Nadelstiche durch correspondirende Punkte der zu vereinigenden Zeichnungen zu machen. Die Wand des dunkeln Kastens, in welchem das Bild angeheftet wird, ist hinter diesen Nadelstichen selbst durchbohrt und das Zimmer nicht ganz verdunkelt, so dass der Beobachter die beiden Nadelstiche mittels des schwachen hindurchfallenden Lichtes sehen kann. Er richtet auf sie die Blicklinien, so dass ihre Bilder im gemeinschaftlichen Sehfelde sich decken, und dann lässt er den Funken überschlagen. Dabei geben stereoskopische Zeichnungen von nicht zu grossen Differenzen, wie *E*, *M* und *N*, *Taf. VII* und *VIII*, ganz deutliche und lebendige Tie-

fenanschauung ohne wahrnehmbare Doppelbilder; solche von grösseren Differenzen, wie *H*, zerfallen aber in einzelne Linien und geben keine Tiefenanschauung. Auch alle über einander stehenden Horizontallinien, wie in *F*, trennen sich auffallend leicht. Hat man dabei einfache Zeichnungen von wenigen Linien vor sich, so übersieht man bei der instantanen Beleuchtung das Ganze auf einmal. Hat man dagegen complicirte stereoskopische Photographien vor sich mit vielen Einzelheiten, so gewinnt man nur von einem gewissen Theile des Ganzen einen deutlichen Eindruck und braucht mehrere Funken, um nach einander das Ganze zu übersehen. Dabei ist es sonderbar, dass während man die beiden Nadelstiche fest fixirt und in Deckung erhält, man willkührlich vor dem Funken die Aufmerksamkeit auf eine beliebige Stelle des dunklen Gesichtsfeldes richten kann, und dann während des Funkens einen Eindruck nur von den Objecten erhält, die in dieser Gegend des Sehfeldes erscheinen. Es ist in dieser Beziehung die Aufmerksamkeit ganz unabhängig von der Stellung und Accommodation des Auges, überhaupt von irgend einer der bekannten Veränderungen in und an diesem Organe, und demgemäss kann sie mit einer selbstbewussten und willkührlichen Anstrengung auf eine bestimmte Stelle in dem absolut dunklen und unterschiedslosen Gesichtsfelde hingerichtet werden. Es ist dies einer der auffallendsten Versuche für eine künftige Theorie der Aufmerksamkeit.

Die Versuche mit momentaner Beleuchtung sind auch noch in sofern für die Rolle, welche die Aufmerksamkeit bei den Doppelbildern spielt, interessant, als es bei solchen Bildern, die wie *J* ohne grosse Anstrengung sowohl stereoskopisch einfach, als auch mit geringer Mühe als Doppelbilder gesehen werden können, leicht gelingt, beides auch beim Lichte des elektrischen Funkens zu sehen. Der erste Eindruck ist gewöhnlich der stereoskopisch einfache; wenn man aber in Pausen von etwa 10 Secunden, in denen die Nachbilder vollständig erlöschen können, die Beobachtung wiederholt, so fängt man an die Doppelbilder zu sehen, trotzdem man immer denselben Punkt fixirt und jede nachfolgende Lichteinwirkung der ersten absolut gleich ist. Ja, selbst bei solchen Figuren, wie *M*, wo es mir relativ schwer wird die Doppelbilder zu sehen, kann ich sie auch bei instantaner elektrischer Beleuchtung endlich sehen, wenn ich mir vorher lebhaft vorzustellen suche, wie sie aussehen müssen. Der Einfluss der Aufmerksamkeit ist hier reiner zu beobachten, weil jede Einwirkung der Augenbewegungen ausgeschlossen ist. Die gleichen Versuche können auch mit Volkmann's schon oben beschriebenem Tachistoskop ausgeführt werden.

Ferner ist zu bemerken, dass es verschiedenen zuverlässigen Beobachtern, wie Wheatstone[1], Rogers[2] und Wundt[3], gelungen ist, auch Nachbilder, welche nicht ganz genau correspondirende Lage hatten, zu einer stereoskopischen Tiefenwahrnehmung zu verschmelzen. Rogers hat es sogar möglich gefunden, erst das Nachbild in dem einen, dann im andern Auge zu entwickeln und schliesslich beide Nachbilder stereoskopisch zu combiniren. Dadurch ist der Einfluss, den

---

[1] *Phil. Transact.* 1838. T. II, p. 392—393.
[2] *Silliman's Journal* (2) XXX, November 1860.
[3] Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. S. 286—287.

die vorausgängige Anschauung der wirklichen Bilder auf die Deutung der Nachbilder allenfalls haben könnte, vermieden. An positiven Nachbildern, die ich selbst durch momentanes Anschauen hell beleuchteter Gegenstände entwickelt hatte, habe ich übrigens auch deutliche Tiefenanschauung gehabt.

Auch diese Versuche zeigen, wie die mit dem elektrischen Funken, dass keine Bewegung der Augen nöthig ist, um Tiefenwahrnehmung zu vermitteln, denn bei jeder Bewegung verschieben sich die Nachbilder mit dem Auge und durch keine Augenbewegung können disparate Bilder zu correspondirenden gemacht werden. Uebrigens gelingen die Versuche mit den Nachbildern schwer; diese müssen sehr scharf entwickelt sein, und selbst wenn sie es sind, besteht immer eine Neigung, sie auf die Fläche des reellen Hintergrunds, den man anschaut, zu projiciren und als blosse Flecke auf dessen Oberfläche anzusehen.

Panum hat die Regel für das Verschmelzen der Doppelbilder in der Weise ausgesprochen, dass einander ähnliche Contouren, welche auf nahehin correspondenten Netzhautpunkten sich abbilden, mit einander verschmelzen sollen. Er bezeichnet dabei den Umfang derjenigen Punkte der andern Netzhaut, welche mit ein und demselben Punkte der ersten Netzhaut verschmelzen können, als den correspondirenden Empfindungskreis jenes Punktes. Diesen Empfindungskreisen schreibt er nach Maassgabe der oben erörterten Thatsachen einen grösseren horizontalen Durchmesser, einen kleineren verticalen zu. Ich habe dagegen in der hier gegebenen Darstellung das Verschmelzen der Doppelbilder davon abhängig gemacht, dass die Sicherheit und Genauigkeit der Abmessungen des Augenmaasses für die entsprechenden Dimensionen beider Bilder nicht gross genug sei, um nicht Irrthümer zu erlauben, und dass ein solcher Irrthum begünstigt werde durch die Anschauung des einen körperlich ausgedehnten Objects, welches man vor sich hat oder vor sich zu haben glaubt. Es hat schon Volkmann gegen Panum's Fassung des Gesetzes solche Fälle, wie *G, Taf. VII,* geltend gemacht, wo durch Zusetzung eines Punktes oder anderer kleiner Incongruenzen beider Bilder die Verschmelzung gestört wird. Panum hat dawider entgegnet, dass in diesen Fällen immer eine Unähnlichkeit der Contouren auftrete, welche auch nach seiner Fassung des Gesetzes die Verschmelzung hindern müsste. Gegen andere Versuche von Volkmann, aus denen hervorgeht, dass Linienpaare von kleinem Abstande bei gleicher Differenz des Abstandes nicht so leicht verschmelzen, als solche von grösseren Abständen, hat er die Antwort gegeben, dass eng an einander stehende Linien sich bei der Fixation ganz nahe am Centrum der Netzhaut abbilden, und dass dort die correspondirenden Empfindungskreise kleiner seien und deshalb die Doppelbilder nicht verschmelzen könnten. Volkmann's letzterwähnte Beobachtung können wir aber in folgender Weise wiederholen. In *Fig. U, Taf. X,* sind jederseits 5 Linien gezeichnet; die Paare 1 und 3, sowie 4 und 5 haben in der linken Gruppe den Abstand von 4 Millimeter, in der rechten 5 Millimeter. In das Innere des Paares 1—3 ist jederseits noch die Linie 2 hineingesetzt worden, welche beiderseits von 1 den gleichen Abstand von 3 Millimeter hat und daher von der Linie 3 links nur 1, rechts aber 2 Millimeter absteht. Fixirt man nun die Linie 4 des Gesammtbildes, so erscheint 5 einfach und etwas nach hinten liegend. Fixirt man dagegen fest und

sicher 1, so erscheinen die beiden Linien 3 von einander getrennt, die Linie 2 dagegen natürlich einfach und mit 1 in gleichem Tiefenabstande. Nur bei Bewegungen des Blicks kann man auch 3 einfach sehen, wobei dann die ganze Gruppe als ein vierkantiges senkrechtes Prisma erscheint, auf dessen vorderer Fläche noch eine Linie, nämlich 2, parallel mit den Kanten gezogen ist. Nun liegen aber bei der Fixation der Linie 1 des Gesammtbildes die beiden Linien 3 gerade so auf den Netzhäuten, wie bei Fixation von 4 die beiden Linien 5 liegen. Das Hinderniss der Vereinigung besteht offenbar in der Linie 2, die aber nicht zwischen beiden, sondern links von beiden liegt, und nach Panum's Fassung des Gesetzes die Vereinigung nicht hindern sollte. Fasst man aber die Vereinigung der Doppelbilder als eine Täuschung des Augenmaasses, so ist aus dem Fechner'schen Gesetze klar, dass die Unterscheidung zwischen 1 und 2 Millimeter des Abstandes, wie ihn die Linien 2 und 3 haben, sicherer sein muss, als zwischen 4 und 5 Millimeter bei den Linien 4 und 5.

Auch bei den Versuchen mit Kreisen kommt Aehnliches vor. Wenn man zwei etwas ungleiche Kreise gezeichnet hat, die sich binocular verschmelzen lassen, und man umgiebt beide concentrisch mit einem andern Kreise, der auf beiden Seiten gleichen Radius hat, einen Radius wenig grösser als der des grösseren der beiden ersten Kreise, so trennen sich jezt die Bilder der beiden innern Kreise verhältnissmässig leicht.

Eine Frage endlich, die sich hier anschliesst und die ebenfalls in theoretischer Beziehung Wichtigkeit hat, ist die, ob wir die Eindrücke des einen Auges von denen des andern unterscheiden. In dieser Beziehung ist zu bemerken, dass wir auch bei instantaner elektrischer Beleuchtung die Tiefenunterschiede stereoskopisch gesehener Liniengruppen immer richtig sehen, niemals verkehrt, und dass selbst, wenn ich mir möglichst deutlich das umgekehrte Relief der Figur vorzustellen suchte, um mit Absicht eine Täuschung herbeizuführen, was mir bei der Umkehrung des Reliefs von Medaillen bei monocularer Betrachtung meist schnell gelingt, ich es unmöglich fand, das stereoskopische Relief zu ändern[1]. Eine solche Verkehrung des Reliefs würde aber nothwendig eintreten müssen, wenn man den Eindruck der beiden Netzhautbilder verwechseln könnte mit demjenigen Eindrucke, welcher bei Vertauschung der beiden Netzhautbilder unter einander eintreten würde. Daraus folgt also zunächst, dass der momentane Eindruck, den zwei Netzhautbilder machen, deutlich und bestimmt verschieden sein muss von demjenigen, welchen dieselben Netzhautbilder machen würden, wenn jedes auf die correspondirenden Punkte des andern Auges übertragen würde.

Etwas anderes ist es, dass wir für gewöhnlich kein bestimmtes Bewusstsein davon haben, mit welchem Auge wir das eine oder andere Bild sehen. Das wissen wir nicht oder nur unvollkommen und nur durch nebensächliche Umstände zu beurtheilen, wie wir denn aus unseren Sinnesempfindungen nichts herauszulesen wissen, was wir nicht durch oft wiederholte Beobachtungen als ihre Bedeutung kennen gelernt haben. Dass also zwei nahe an einander stehende

[1] Dieselben Beobachtungen von Aubert und Marbach in Aubert Physiologie der Netzhaut. S. 315. Breslau 1865, mit vielfach abgeänderten Figuren. Neuerdings hat auch Donders im Wesentlichen dieselben Resultate erhalten.

Doppelbilder gewisser Art mit gewissen Localzeichen ein Object, welches ferner von uns ist als der Fixationspunkt, und nicht ein näheres bedeuten, können wir vollkommen gelernt haben, ohne doch genügende Uebung zu haben, um aus den Localzeichen der Bilder herauszulesen, welches von den beiden Halbbildern dem rechten oder linken Auge angehöre. Um letzteres zu ermitteln, müssen wir erst das eine Auge schliessen oder verdecken, was wir beim gewöhnlichen Sehen nicht thun, wobei wir, wie oben erwähnt, auf die Doppelbilder ja auch gar nicht zu achten pflegen. Wir wissen deshalb in der Regel auch ohne einen besonders darauf zielenden Versuch nicht anzugeben, welchem Auge das eine, welchem das andere Doppelbild angehört. Auch die Augenbewegungen helfen dabei nicht viel, weil wir bei Convergenzbewegungen — und auf solche käme es hier an — keine deutliche Vorstellung davon haben, nach welcher Richtung sich jedes einzelne Auge verschiebt.

Dagegen sehen wir fortdauernd die am weitesten rechts gelegenen Theile des gemeinsamen Gesichtsfeldes nur mit dem rechten Auge; dem linken werden sie durch die Nase verdeckt; und ebenso sehen wir die ganz links gelegenen Objecte nur mit dem linken Auge, und dem entsprechend urtheilen wir denn leicht, dass, wenn jene Gegend des Gesichtsfeldes einem Auge ganz verdunkelt ist, wir die gesehenen Objecte mit dem andern Auge sehen. ROGERS hat einen Versuch mit auffallendem Erfolge angegeben, der hierher gehört. Man mache aus schwarzem Papier eine Röhre von etwa 2 Zoll Durchmesser, halte sie vor das rechte Auge und sehe damit nach dem Hintergrunde des Zimmers, am besten nach links hinüber, während man gleichzeitig einige Zoll vor dem linken Auge ein Quartblatt schwarzen Papiers hält, welches diesem den gesehenen Theil des Zimmerhintergrundes verdeckt. Dann tritt sehr energisch die Täuschung ein, als sähe man mit dem linken Auge durch eine Oeffnung des Papiers nach dem Hintergrunde des Zimmers, während doch das Papier keine Oeffnung hat, und nicht das linke, sondern das rechte Auge durch die Oeffnung der Röhre blickt.

Uebrigens muss ich doch wiederum bemerken, dass, wenn ich zwei stereoskopische Photographien vor mir habe, von denen eine einen dunklen oder verwaschenen Fleck hat, ich gewöhnlich den Eindruck habe, als wäre das Auge, womit ich den Fleck sehe, getrübt, und dass ich unwillkührlich versuche, mit den Lidern dieses Auges die Trübung wegzuwischen, was doch ein Zeichen ist, dass ich in einem solchen Falle empfinde, in welchem Auge die undeutliche Stelle abgebildet ist.

Was die Richtung betrifft, in der wir die Doppelbilder sehen, so ergiebt sich diese aus dem, was über die Richtung der monocular gesehenen Bilder oben schon gesagt worden ist. Wir sehen das Bild jedes Auges so, als hätte das von E. HERING angenommene imaginäre cyklopische Auge das entsprechende Netzhautbild erhalten, während es nach dem Fixationspunkte hingerichtet ist. Wird also binocular gesehen, so kann man sich beide Netzhautbilder in das imaginäre cyklopische Auge sich gegenseitig deckend eingetragen denken, und dann entsprechend in den Raum projicirt. Ihre Entfernung vom Beobachter wird so weit richtig beurtheilt, als die bei Doppelbildern unvollkommene stereoskopische Tiefenwahr-

nehmung und die Hilfsmittel der monocularen Beurtheilung der Entfernung dies möglich machen. Aus der angegebenen von E. HERING und J. TOWNE[1] gemachten Beobachtung erklärt sich nun auch, warum die Doppelbilder immer getrennt in den Raum projicirt werden. Würden sie in der richtigen Richtung ihrer Visirlinien projicirt, so würden sie an denjenigen Ort verlegt werden können, wo die betreffenden Visirlinien sich schneiden, und dann einfach erscheinen. In Wahrheit wird aber durch die irrthümliche Beziehung der Sehrichungen auf ein Centrum in der Mittelebene des Gesichts bewirkt, dass zwei verschiedene Sehrichtungen vor dem Beobachter im Raume sich nie wieder schneiden können und die in ihrer Richtung projicirten Bildpunkte nothwendig immer getrennt bleiben müssen. Ueber den vermuthlichen Grund dieses Irrthums ist schon oben gesprochen worden.

Gesetze der correspondirenden Punkte und Linien. Man denke sich zwei Ebenen normal zu den beiden Blicklinien in gleicher Entfernung von deren Kreuzungspunkte. In der einen seien die Coordinaten x und y, in der andern ein beliebig gelegtes anderes System ξ und v. Für die Schnittpunkte der beiden Blicklinien mit den Ebenen sei $x = y = 0$ und $\xi = v = 0$. Die Ebenen der Netzhauthorizonte mögen die beiden Ebenen in den Linien

$$ax + by = 0 \quad \text{und} \quad \alpha\xi + \beta v = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

schneiden; die scheinbar verticalen Meridianebenen in den Linien

$$cx + dy = 0 \quad \text{und} \quad \gamma\xi + \delta v = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{a}).$$

Wenn nun die Coefficienten so gewählt sind, dass

$$\left.\begin{aligned} a^2 + b^2 = \alpha^2 + \beta^2 = 1 \\ c^2 + d^2 = \gamma^2 + \delta^2 = 1 \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{b}),$$

welchen Bedingungen man immer dadurch Genüge leisten kann, dass man beide Coefficienten je einer Gleichung mit einem constanten Factor multiplicirt, wobei die Gleichungen 1) und 1 a) weiter nicht geändert werden, so bedeutet nach einem bekannten Satze der analytischen Geometrie der Ausdruck

$$ax + by$$

die Entfernung des Punktes (x, y) von der Linie, deren Gleichung ist $ax + by = 0$. Entsprechende Bedeutung haben die andern Ausdrücke, die in den Gleichungen 1) und 1 a) gleich Null gesetzt sind. Den erwähnten Factoren, mit welchen die Coefficienten dieser Gleichungen zu multipliciren sind, kann man ausserdem ein solches Vorzeichen geben, dass die Ausdrücke

$$ax + by \quad \text{und} \quad \alpha\xi + \beta v$$

positiv auf correspondirenden Seiten der beiden Netzhauthorizonte, und ebenso die Ausdrücke

$$cx + dy \quad \text{und} \quad \gamma\xi + \delta v$$

positiv sind auf correspondirenden Seiten der scheinbar verticalen Meridianebenen.

---

[1] Herr J. TOWNE hat die wichtigen Beobachtungen über die scheinbaren Sehrichtungen unabhängig von Herrn E. HERING gemacht. Er berichtet mir brieflich, dass er die Versuche schon im Jahre 1859 gezeigt habe. Seine Publicationen, so weit sie mir bekannt geworden sind, datiren aber erst von 1862 ab.

Die Versuche haben uns zu dem Gesetze geführt, dass solche Punkte beider Ebenen correspondiren, welche gleich weit von den Ebenen der Netzhauthorizonte abstehen und ausserdem gleich weit von den Ebenen der scheinbar verticalen Meridiane entfernt sind. Sind die vorausgenannten Bedingungen bezüglich der Coefficienten in den Gleichungen 1) und 1 a) erfüllt, so sind die Bedingungen der Correspondenz:

$$\left.\begin{array}{l} ax + by = \alpha\xi + \beta v \\ cx + dy = \gamma\xi + \delta v \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,c).$$

Eine gerade Linie des einen Feldes nennen wir correspondent einer des anderen Feldes, wenn jeder Punkt der ersten einen correspondenten Punkt in der andern findet.

Wenn wir beliebige Constanten mit l, m, n bezeichnen, so ist die Linie:

$$l(ax + by) + m(cx + dy) + n = 0 \quad \ldots\ldots \quad 1\,d),$$

correspondent mit der Linie im andern Felde

$$l(\alpha\xi + \beta v) + m(\gamma\xi + \delta v) + n = 0 \quad \ldots\ldots \quad 1\,e).$$

Denn wenn wir für irgend welche constanten Werthe von (x, y) im zweiten Felde die Linie ziehen:

$$\alpha\xi + \beta v = ax + by \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,f),$$

so ist für deren Schnittpunkt mit der Linie 1 e) auch

$$\gamma\xi + \delta v = cx + dy,$$

wie aus der Subtraction der Gleichungen 1 d) und 1 e) in diesem Falle folgt. Der Schnittpunkt von 1 e) und 1 f) ist also in diesem Falle correspondent mit dem Punkte (x, y).

Es wird sich die Gleichung jeder geraden Linie

$$fx + gy + h = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1\,g)$$

leicht auf die Form 1 d) bringen lassen, indem man setzt

$$f = la + mc$$
$$g = lb + md$$
$$h = n$$

oder

$$l = \frac{df - gc}{ad - bc}$$
$$m = \frac{bf - ag}{bc - ad}$$
$$n = h,$$

wodurch die drei Coefficienten der Gleichung 1 d) eindeutig bestimmt sind. Indem man dann aus der Gleichung 1 d) die Gleichung 1 e) bildet, findet man die correspondirende Linie von 1 g).

Wenn wir die Gleichung 1 d) dividiren durch

$$k = \sqrt{(la + mc)^2 + (lb + md)^2},$$

so kommt die Gleichung auf die Normalform der Flächengleichungen, wobei die

Grösse $\frac{n}{k}$ den Abstand zwischen der Fläche 1 d) und dem Nullpunkte der Coordinaten bezeichnet. Setzen wir

$$\varkappa = \sqrt{(l\alpha + m\gamma)^2 + (l\beta + m\delta)^2},$$

so bezeichnet $\frac{n}{\varkappa}$ dieselbe Distanz für die Fläche 1 e). Beide Distanzen sind also nur dann gleich, wenn

$$k^2 = \varkappa^2.$$

Mit Berücksichtigung der Gleichung 1 b) wird dies:

$$2ml(ac + bd) - 2ml(\alpha\gamma + \beta\delta) = 0.$$

Wenn nun nicht

$$ac + bd = \alpha\gamma + \beta\delta$$

ist, das heisst, wenn die beiden Ebenenpaare 1) und 1 a) in jedem Auge nicht gleiche Winkel mit einander machen, so ist jene Bedingung nur zu erfüllen, wenn entweder $m = 0$ oder $l = 0$ ist, das heisst, wenn die Ebenen 1 d) und 1 e) entweder mit den Ebenen 1) oder mit den Ebenen 1 a) zusammenfallen. Diese beiden sind durch die angegebene Eigenschaft also vor allen anderen correspondirenden Ebenenpaaren, welche durch die Blicklinie gehen, ausgezeichnet. Wir können deshalb die genannten beiden Ebenen als Hauptmeridianebenen bezeichnen.

Berechnung correspondirender Strecken und Winkel in beiden Augen. Legen wir der Bequemlichkeit wegen die x und ξ Axe in den Netzhauthorizont, so wird in den Gleichungen 1)

$$a = \alpha = 0, \qquad b = \beta = 1$$

und setzen wir die Lage der scheinbar verticalen Meridiane, wie dies wenigstens in der Regel sehr nahehin der Fall ist, als symmetrisch voraus, so ist zu nehmen

$$\frac{d}{c} = -\frac{\delta}{\gamma} = -\operatorname{tang}\varepsilon,$$

wo ε die Abweichung zwischen dem scheinbar und wirklich verticalen Meridiane jedes Auges bezeichnet. Dann ist

$$c = \cos\varepsilon \qquad \gamma = \cos\varepsilon$$
$$d = -\sin\varepsilon \qquad \delta = \sin\varepsilon.$$

Die Gleichungen der Netzhauthorizonte sind dann

$$y = 0 \quad \text{und} \quad v = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{ h}),$$

die der scheinbar verticalen Linien

$$x\cos\varepsilon - y\sin\varepsilon = 0 \quad \text{und} \quad \xi\cos\varepsilon + v\sin\varepsilon = 0 \quad . \quad . \quad . \quad 1\text{ i})$$

und die Gleichungen correspondirender Linien, welche durch die Blickpunkte gehen, werden nach 1 d) und 1 e)

$$xm\cos\varepsilon + y(l - m\sin\varepsilon) = 0$$
$$\xi m\cos\varepsilon + v(l + m\sin\varepsilon) = 0.$$

Sind s und σ die Winkel, welche diese Linien mit den Axen der x und ξ machen, so ist

$$\operatorname{tang} s = \frac{y}{x} = -\frac{m \cos \varepsilon}{l - m \sin \varepsilon}$$

$$\operatorname{tang} \sigma = \frac{v}{\xi} = -\frac{m \cos \varepsilon}{l + m \sin \varepsilon},$$

woraus folgt:

$$\operatorname{tang} (\sigma - s) = \frac{2 m^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon}{l^2 + m^2 \cos (2\varepsilon)}$$

$$\operatorname{tang} (\sigma + s) = -\frac{2 m l \cos \varepsilon}{l^2 - m^2}.$$

Setzen wir nun

$$\frac{m}{l} = \operatorname{tang} \beta,$$

so wird

$$\operatorname{tang} (\sigma - s) = \frac{\operatorname{tang}^2 \beta \cdot \sin (2\varepsilon)}{1 + \operatorname{tang}^2 \beta \cos (2\varepsilon)}$$

$$\operatorname{tang} (\sigma + s) = -\operatorname{tang} (2\beta) \cos \varepsilon$$

oder da ε ein verhältnissmässig kleiner Winkel ist und deshalb $\cos \varepsilon = \cos 2\varepsilon = 1$ und $\sin (2\varepsilon) = 2\varepsilon$ gesetzt werden kann

$$\beta = -\frac{s + \sigma}{2}$$

$$\sigma - s = 2\varepsilon \sin^2 \beta.$$

Die Winkel s und σ sind von den Netzhauthorizonten ab gezählt. Sollen sie von der Visirebene ab gerechnet werden, so muss zu der Differenz noch der Winkel γ hinzukommen, den die Netzhauthorizonte machen, und wir erhalten dann die oben gebrauchte Formel für ihre Differenz

$$\Delta = \gamma + 2\varepsilon \sin^2 \beta \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2).$$

Correspondirende Visirlinien und Ebenen. Ziehen wir durch jeden einzelnen eines Paars correspondirender Punkte und den Mittelpunkt der Visirlinien des zugehörigen Auges gerade Linien, so sind diese correspondirende Visirlinien. Punkte, die in solchen correspondirenden Visirlinien liegen, werden auf Deckstellen beider Netzhäute abgebildet.

Befindet sich in den bisher betrachteten Ebenen der (x, y) und (ξ, v) ein Paar correspondirender gerader Linien verzeichnet, so liegen deren Visirlinien alle in zwei durch die Mittelpunkte der Visirlinien gehenden Ebenen, welche correspondirende Ebenen genannt werden können.

Jedes Paar gerader Linien, welches in einem Paare correspondirender Ebenen gezogen ist, bildet sich auf correspondirenden Linien beider Netzhäute ab.

Wenn zwei correspondirende Ebenen sich schneiden, so bildet sich die Schnittlinie auf correspondirenden Linien beider Netzhäute ab.

Die Coordinaten der Mittelpunkte der Visirlinien seien

$$x = 0, \qquad y = 0, \qquad z = e$$

$$\xi = 0, \qquad v = 0, \qquad \zeta = e.$$

Nach bekannten Sätzen der analytischen Geometrie ist die Gleichung einer Ebene, welche durch den Punkt (x, y, z) geht, von der Form

$$fx + gy + \frac{h}{e}(e - z) = 0.$$

Setzen wir $z = 0$, so kommt diese Gleichung unmittelbar auf die Form 1 g) und ist nach der dort angegebenen Methode die correspondirende Linie in der (ξ, v) Ebene, und danach die correspondirende Ebene zu finden.

Bilden wir die Gleichungen

$$\left.\begin{array}{ll} A = ax + by & \mathfrak{A} = \alpha\xi + \beta v \\ B = cx + dy & \mathfrak{B} = \gamma\xi + \delta v \\ C = z - e & \mathfrak{C} = \zeta - e \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 3),$$

so sind alle Ebenen, deren Gleichungen von der Form sind

$$\left.\begin{array}{l} lA + mB + nC = 0 \\ l\mathfrak{A} + m\mathfrak{B} + n\mathfrak{C} = 0 \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3\,a)$$

correspondirende Ebenen. Denn die Gleichungen sind von der Form derjenigen, welche durch die Mittelpunkte der Visirlinien gehen, und wenn wir $z = 0$ und $\zeta = 0$ setzen, behalten wir nach dem in 1 d) und 1 e) ausgesprochenen Satze die Gleichungen correspondirender Linien übrig, die in den xy und ξv Ebenen liegen. Folglich sind die Ebenen correspondirend.

Correspondirende Visirlinien sind zu geben als Schnittlinien je zweier Paare correspondirender Ebenen.

Gleichungen für die einfach gesehenen Geraden. Bisher haben wir die Lage der correspondirenden Linien und Ebenen nur in Bezug auf die Lage des zugehörigen Auges betrachtet, aber die Lage der Augen gegen einander und zu den Objecten des Raumes noch gar nicht berücksichtigt. Um das letztere zu thun, denken wir uns die Lage aller Punkte und der Augen selbst auf ein gemeinsames rechtwinkeliges Coordinatensystem der $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$ bezogen. Wenn wir die x, y, z und ξ, v, ζ durch diese neuen Coordinaten ausdrücken, werden ihre Werthe bekanntlich lineare Functionen der $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$, und ebenso auch die linear aus x, y, z, beziehlich ξ, v, ζ zusammengesetzten Grössen A, B, C und $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$.

Durch jeden Raumpunkt geht im Allgemeinen eine einfach gesehene gerade Linie. Der Beweis hierfür ist zu führen, wie folgt. Die Gleichungen correspondirender Ebenen sind nach 3 a)

$$\left.\begin{array}{l} lA + mB + nC = 0 \\ l\mathfrak{A} + m\mathfrak{B} + n\mathfrak{C} = 0 \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3\,b).$$

Beide zusammengenommen geben die Lage ihrer Schnittlinie, welche, wie schon bemerkt wurde, einfach gesehen und also eine gerade Horopterlinie wird.

Wenn man in 3 a) für $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$ die Coordinaten irgend eines beliebigen Punktes $\mathfrak{x}_0$, $\mathfrak{y}_0$, $\mathfrak{z}_0$ setzt, werden sich doch immer die Coefficienten l, m, n so bestimmen lassen, dass die beiden Gleichungen 3 b) erfüllt sind. Da man durch Multiplication mit einem gemeinsamen Factor einem der Coefficienten einen beliebigen Werth geben kann, so sind nur zwei zu bestimmen, wozu die beiden Gleichungen im Allgemeinen ausreichen. Man erhält

$$\frac{l}{n} = \frac{B_0 \mathfrak{C}_0 - \mathfrak{B}_0 C_0}{A_0 \mathfrak{B}_0 - \mathfrak{A}_0 B_0}$$

$$\frac{m}{n} = \frac{A_0 \mathfrak{C}_0 - \mathfrak{A}_0 C_0}{\mathfrak{A}_0 B_0 - A_0 \mathfrak{B}_0}.$$

Dadurch sind Werthe der Verhältnisse von l, m, n bestimmt, welche den Gleichungen 3a) genügen, und zwar im Allgemeinen eindeutig, vorausgesetzt, dass die obigen Brüche nicht von der Form $\frac{0}{0}$ werden, was geschieht, wenn

$$\left.\begin{aligned} A_0 \mathfrak{C}_0 &= \mathfrak{A}_0 C_0 \\ B_0 \mathfrak{C}_0 &= \mathfrak{B}_0 C_0, \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3\text{c}).$$

woraus dann im Allgemeinen folgt, dass auch

$$A_0 \mathfrak{B}_0 = \mathfrak{A}_0 B_0$$

Wir werden später sehen, dass diese drei letzteren Gleichungen den Punkten der Horoptercurve entsprechen. Mit Ausnahme also dieser Punkte lässt sich durch jeden Punkt des Raumes eine und nur eine gerade und einfach gesehene Linie legen, durch die mittels der Gleichungen 3c) gegebenen Punkte aber beliebig viele.

Flächen zweiten Grades, auf denen die einfach gesehenen Linien liegen. Wenn man zwei Paare correspondirender Flächen hat

$$\left.\begin{aligned} l_0 A + m_0 B + n_0 C = 0, \quad & l_0 \mathfrak{A} + m_0 \mathfrak{B} + n_0 \mathfrak{C} = 0 \\ l_1 A + m_1 B + n_1 C = 0, \quad & l_1 \mathfrak{A} + m_1 \mathfrak{B} + n_1 \mathfrak{C} = 0 \end{aligned}\right\} \quad .\ . \quad 4),$$

so schneiden sich die beiden rechts stehenden Flächen in einer Visirlinie, die links stehenden in der correspondirenden Visirlinie. Multiplicirt man nun die unteren Gleichungen mit einem neuen Factor k und addirt sie zu den oberen, so erhält man

$$\left.\begin{aligned} (l_0 + k l_1) A + (m_0 + k m_1) B + (n_0 + k n_1) C &= 0 \\ (l_0 + k l_1) \mathfrak{A} + (m_0 + k m_1) \mathfrak{B} + (n_0 + k n_1) \mathfrak{C} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad .\ . \quad 4\text{a}).$$

Es sind dies die Gleichungen eines dritten Paars correspondirender Flächen, welche aber ebenfalls durch dasselbe Paar Visirlinien gehen, wie die Flächen der Gleichungen 4). Da nämlich für die Punkte der einen Visirlinie die beiden Gleichungen links unter 4) erfüllt sind, ist auch nothwendig die obere Gleichung 4a) für dieselben Punkte erfüllt, das heisst die Punkte jener Visirlinien liegen auch in der der letzteren Gleichung entsprechenden Fläche. Dasselbe gilt für die rechtsstehenden Gleichungen unter 4) und die untere unter 4a).

Die beiden Gleichungen 4a) geben zusammen eine einfach gesehene gerade Linie, da sie einzeln genommen correspondirenden Ebenen entsprechen. Lassen wir nun den Factor k sich continuirlich verändern, so wird im Allgemeinen auch die einfach gesehene gerade Linie ihre Lage verändern, und zwar in continuirlicher Weise. Alle diese geraden Linien, welche auf solche Weise durch continuirliche Aenderung von k sich ergeben, werden sich zu einer Fläche zusammenschliessen, deren Gleichung sich ergiebt, wenn wir aus den beiden Gleichungen 4a) den Factor k eliminiren. So erhalten wir als Gleichung für die Fläche, in der die genannte Reihe einfach gesehener gerader Linien liegt:

$$\begin{aligned} & [l_0 A + m_0 B + n_0 C]\,[l_1 \mathfrak{A} + m_1 \mathfrak{B} + n_1 \mathfrak{C}] \\ - & [l_1 A + m_1 B + n_1 C]\,[l_0 \mathfrak{A} + m_0 \mathfrak{B} + n_0 \mathfrak{C}] = 0 \end{aligned}$$

oder wenn wir die Multiplication ausführen:

$$(l_0 m_1 - l_1 m_0)[A\mathfrak{B} - \mathfrak{A}B] + (l_1 n_0 - l_0 n_1)[\mathfrak{A}C + A\mathfrak{C}]$$
$$+ (m_0 n_1 - m_1 n_0)[B\mathfrak{C} - \mathfrak{B}C] = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4\text{b}).$$

Da die Grössen A, B, C, so wie $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ lineare Functionen von $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$ sind, so ist die Gleichung 4b) die einer Fläche zweiten Grades, und zwar einer solchen, in deren Oberfläche unendlich lange gerade Linien gezogen werden können. Unter den Flächen zweiten Grades lassen dies zu die Hyperboloide mit einer Mantelfläche, welche im Grenzfall in Kegel, Cylinder oder auch zwei sich schneidende Ebenen übergehen können.

Vergleichen wir nun die Gleichung 4b) mit den Gleichungen 3c), welche die Punkte geben, durch welche unendlich viele einfach gesehene gerade Linien gezogen werden können:

$$\left.\begin{array}{l} A\mathfrak{C} - \mathfrak{A}C = 0 \\ \mathfrak{B}C - B\mathfrak{C} = 0 \\ \mathfrak{A}B - A\mathfrak{B} = 0 \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4\text{c}),$$

so sehen wir, dass auch dies Gleichungen von Hyperboloiden sind, und zwar derselben Art, wie die Fläche 4b), welche letztere bei bestimmten Werthen der Coefficienten l, m, n in je eine der Gleichungen 4c) übergehen kann.

Nehmen wir zwei von den letzteren, zum Beispiel

$$\left.\begin{array}{l} A\mathfrak{C} - \mathfrak{A}C = 0 \\ B\mathfrak{C} - \mathfrak{B}C = 0 \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4\text{d}),$$

so werden dieselben sich in einer Curve schneiden müssen, da sie jedenfalls zwei Punkte gemein haben, nämlich die Mittelpunkte der Visirlinien, für deren einen

$$A = B = C = 0,$$

während für den andern

$$\mathfrak{A} = \mathfrak{B} = \mathfrak{C} = 0$$

und jede dieser beiden Annahmen den beiden Flächengleichungen genügt. Ausserdem ist leicht zu sehen, dass auch die Annahme

$$C = \mathfrak{C} = 0$$

den beiden Flächengleichungen genügt, das heisst, die gerade Schnittlinie der beiden Flächen $C = 0$ und $\mathfrak{C} = 0$ muss beiden Hyperboloiden angehören, also mit zu ihrer gesammten Schnittlinie gehören. Diese Schnittlinie setzt sich also zusammen aus einer geraden Linie $C = 0$, $\mathfrak{C} = 0$, und einem anderen Stück, welches im Allgemeinen eine Curve doppelter Krümmung sein wird.

Aus den beiden Gleichungen 4d) können wir $\mathfrak{C}$ eliminiren, indem wir die obere mit B, die untere mit A multipliciren und addiren. Wir erhalten

$$(A\mathfrak{B} - \mathfrak{A}B)C = 0.$$

Wenn also C nicht gleich Null ist, so folgt aus dieser Elimination die dritte der Gleichungen 4c)

$$\mathfrak{A}B - A\mathfrak{B} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4\text{e}).$$

Sollte C gleich Null sein, so würde nach 4d) entweder auch $\mathfrak{C} = 0$ sein müssen, oder gleichzeitig $A = B = 0$. Nur im letzteren Falle würde die Gleichung 4e)

giltig sein; die Bedingungen $A = B = C = 0$ gehören dem Mittelpunkte der Visirlinien des einen Auges an.

Daraus folgt, dass für die Punkte der Schnittlinie der Flächen 4d), welche nicht der geraden Linie $C = \mathfrak{C} = 0$ angehören, auch die Gleichung 4e) erfüllt ist, dass also die drei Flächen 4e) sich in ein und derselben Curve doppelter Krümmung schneiden. Je zwei der Flächen haben immer noch eine gerade Schnittlinie, die aber in Allgemeinen nicht der dritten Fläche angehört.

Wenn man nun die Gleichungen dreier Flächen hat

$$X = 0 \qquad Y = 0 \qquad Z = 0,$$

die eine gemeinsame Schnittlinie besitzen, so wird auch jede Fläche, deren Gleichung von der Form ist

$$lX + mY + nZ = 0,$$

durch dieselbe Schnittlinie gehen. Da nämlich für die Punkte der Schnittlinie die ersteren drei Gleichungen erfüllt sind, ist für dieselben auch nothwendig die letztere erfüllt.

Nun ist die Gleichung 4b) in der angegebenen Weise aus den drei Gleichungen 4c) zusammengesetzt. Folglich gehen alle die unendlich vielen Hyperboloide, auf denen die einfach gesehenen Linien liegen, durch die gemeinsame Schnittcurve der Gleichungen 4c).

Diese Curve ist eine sogenannte Curve dritten Grades, das heisst, sie kann von einer und derselben Ebene in drei Punkten geschnitten werden. Da nämlich die Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades wie zum Beispiel der beiden Flächen 4d) im Allgemeinen vom vierten Grade ist und in vier oder zwei Punkten von einer Ebene geschnitten werden kann, einer dieser Schnittpunkte aber nothwendig der geraden Linie angehört (Parallelismus wird als Schneidung im Unendlichen betrachtet), so bleiben nur drei Schnittpunkte oder einer für die Curve. So schneidet zum Beispiel die Visirebene die Horoptercurve im Fixationspunkte und in den Mittelpunkten beider Augen. Denkt man sich die schneidende Ebene unendlich weit entfernt, so wird sie auch in ein oder drei Punkten schneiden müssen, was dann ein oder drei Paare nach entgegengesetzten Richtungen in das Unendliche auslaufender Zweige der Curve giebt.

Die Curve dritten Grades ist Horoptercurve, das heisst, in ihr schneiden sich correspondirende Visirlinien. Die drei Gleichungen 4c) können wir nämlich auch schreiben

$$\frac{A}{\mathfrak{A}} = \frac{B}{\mathfrak{B}} = \frac{C}{\mathfrak{C}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4f).$$

Nun sind die Gleichungen 4) die Gleichungen zweier correspondirender Visirlinien. Nehmen wir die der einen

$$\left.\begin{aligned} l_0 A + m_0 B + n_0 C &= 0 \\ l_1 A + m_1 B + n_1 C &= 0 \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4g)$$

und setzen voraus, dass sie durch einen Punkt der Curve dritten Grades geht, in welchem dann die Gleichungen 4f) erfüllt sind, so folgt: wenn wir die beiden Gleichungen 4g) mit $\frac{\mathfrak{A}}{A}$ multipliciren mit Berücksichtigung von 4f), dass für denselben Punkt auch sei

$$l_0 \mathfrak{A} + m_0 \mathfrak{B} + n_0 \mathfrak{C} = 0$$
$$l_1 \mathfrak{A} + m_1 \mathfrak{B} + n_1 \mathfrak{C} = 0,$$

dass also derselbe Punkt auch der correspondirenden Visirlinie angehört. Es schneiden sich also correspondirende Visirlinien in je einem Punkte der gemeinsamen Schnittlinie der Flächen 4c). Diese ist die Horoptercurve. Dass nicht alle Stücke dieser Curve auch gleichzeitig Horopter sind, ist schon oben erwähnt worden.

Kegel zweiten Grades, welche durch die Horoptercurve gehen. Wenn die beiden correspondirenden Visirlinien der Gleichungen 4) sich in einem Punkte schneiden, der alsdann der Horoptercurve angehört, so gehen auch alle die durch die beiden Visirlinien gelegten Ebenen der Gleichungen 4a) durch denselben Punkt, folglich auch alle Schnittlinien dieser Ebenen, aus denen sich die Oberfläche zweiten Grades zusammensetzt. Eine Fläche zweiten Grades, in der ein System unendlich langer gerader Linien liegt, die alle durch einen und denselben Punkt gehen, ist ein Kegel zweiten Grades.

Jeder Punkt der Horoptercurve ist also die Spitze eines Kegels zweiten Grades, in dessen Mantel die ganze Horoptercurve liegt. Dieser Kegel kann in besonderen Fällen in einen Cylinder (Kegel mit unendlich entfernter Spitze) oder in ein Paar sich schneidender Ebenen (Kegel, dessen elliptische Basis eine unendlich lange Axe hat) übergehen.

Jede gerade Linie, welche zwei Punkte der Horoptercurve schneidet, gehört zwei solchen Kegeln an und wird also einfach gesehen.

Wenn sich einer der Kegel in ein Ebenenpaar verwandeln kann, so besteht die Horoptercurve aus einem ebenen Kegelschnitt und einer geraden Linie, die den Kegelschnitt in einem Punkte schneidet. Denn man denke sich zur Construction der Horoptercurve ausser dem einen Kegel, der durch die beiden Ebenen dargestellt wird, noch einen zweiten, dessen Spitze in einer der beiden Ebenen liegen muss, so schneiden diese sich in zwei geraden Linien und einem Kegelschnitt. Die eine Gerade aber gehört nicht zur Horoptercurve.

Einzelne Fälle. Um nun die wirkliche Berechnung der Horoptercurve in einzelnen Fällen ausführen zu können, müssen wir die Ausdrücke A, B, C und $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ wirklich bilden als Functionen von $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, $\mathfrak{z}$. Wir nehmen an, dass der Fixationspunkt der Nullpunkt dieses letztern Systems sei, die Visirebene die Ebene der $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$, die $\mathfrak{z}$ positiv nach oben steigend. Die Halbirungslinie des Convergenzwinkels der beiden Gesichtslinien sei die Axe der $\mathfrak{x}$, der Convergenzwinkel selbst sei 2γ, die Entfernung des Mittelpunkts der Visirlinien im rechten Auge vom Fixationspunkte sei a, die des linken a_1. Dann sind die Coordinaten für den Mittelpunkt der Visirlinien

im rechten Auge: $\mathfrak{x} = a \cos\gamma$, $\mathfrak{y} = a \sin\gamma$, $\mathfrak{z} = 0$

im linken Auge: $\mathfrak{x} = a_1 \cos\gamma$, $\mathfrak{y} = - a_1 \sin\gamma$, $\mathfrak{z} = 0$.

Nehmen wir nun ein zweites Coordinatensystem zu Hilfe: $\mathfrak{x}_1$, $\mathfrak{y}_1$, $\mathfrak{z}_1$, welches gegen das erste um die $\mathfrak{z}$ Axe und den Winkel γ gedreht ist, so dass seine $\mathfrak{x}_1$ Axe mit der Gesichtslinie des rechten Auges zusammenfällt, so haben wir

$$\mathfrak{x}_1 = \mathfrak{x}\cos\gamma + \mathfrak{y}\sin\gamma$$
$$\mathfrak{y}_1 = -\mathfrak{x}\sin\gamma + \mathfrak{y}\cos\gamma$$
$$\mathfrak{z}_1 = \mathfrak{z},$$

was den beiden Bedingungen genügt, dass

$$\mathfrak{x}_1^2 + \mathfrak{y}_1^2 = \mathfrak{x}^2 + \mathfrak{y}^2$$

und dass für $\mathfrak{x}_1 = a$, $\mathfrak{y}_1 = 0$, die oben angegebenen Werthe der Coordinaten für den Mittelpunkt des rechten Auges sich finden.

In dem System ($\mathfrak{x}_1\ \mathfrak{y}_1\ \mathfrak{z}_1$) fällt die Axe der $\mathfrak{x}_1$ zusammen mit der Axe der z in dem oben in den Gleichungen 1) bis 1 i) gebrauchten System der x, y, z, so dass

$$\mathfrak{x}_1 = a - z + e.$$

Das System der $x\,y\,z$ ist gedreht gegen das erstere um den Winkel ϑ, den der Netzhauthorizont mit der Visirebene macht; also ist

$$x = \mathfrak{y}_1 \cos\vartheta - \mathfrak{z}_1 \sin\vartheta$$
$$y = \mathfrak{y}_1 \sin\vartheta + \mathfrak{z}_1 \cos\vartheta,$$

wobei der Winkel ϑ positiv gerechnet ist für eine Drehung des oberen Endes des senkrechten Meridians nach rechts herum, also beim Blick nach links oben und rechts unten. Demgemäss ist

$$\left.\begin{aligned} x &= -\mathfrak{x}\sin\gamma\cos\vartheta + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos\vartheta - \mathfrak{z}\sin\vartheta \\ y &= -\mathfrak{x}\sin\gamma\sin\vartheta + \mathfrak{y}\cos\gamma\sin\vartheta + \mathfrak{z}\cos\vartheta \\ z &= -\mathfrak{x}\cos\gamma - \mathfrak{y}\sin\gamma + a + e \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \quad 5).$$

Daraus bilden sich nun nach Gleichungen 3) mit Berücksichtigung von 1 h) und 1 i), sowie der dort vorausgeschickten Festsetzungen, die Ausdrücke:

$$\left.\begin{aligned} A &= y = -\mathfrak{x}\sin\gamma\sin\vartheta + \mathfrak{y}\cos\gamma\sin\vartheta + \mathfrak{z}\cos\vartheta \\ B &= x\cos\varepsilon - y\sin\varepsilon \\ &= -\mathfrak{x}\sin\gamma\cos(\vartheta+\varepsilon) + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos(\vartheta+\varepsilon) - \mathfrak{z}\sin(\vartheta+\varepsilon) \\ C &= z - e = a - \mathfrak{x}\cos\gamma - \mathfrak{y}\sin\gamma \end{aligned}\right\} \quad . \; . \quad 5\,a).$$

In ähnlicher Weise finden sich die Ausdrücke $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, wenn ϑ' der Raddrehungswinkel für das linke Auge ist:

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{A} &= +\mathfrak{x}\sin\gamma\sin\vartheta_1 + \mathfrak{y}\cos\gamma\sin\vartheta_1 + \mathfrak{z}\cos\vartheta_1 \\ \mathfrak{B} &= \mathfrak{x}\sin\gamma\cos(\vartheta_1 - \varepsilon) + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos(\vartheta_1 - \varepsilon) - \mathfrak{z}\sin(\vartheta_1 - \varepsilon) \\ \mathfrak{C} &= a_1 - \mathfrak{x}\cos\gamma + \mathfrak{y}\sin\gamma \end{aligned}\right\} \ldots 5\,b).$$

Vereinfachte Formen der Horoptercurve. Solche finden sich namentlich in den Fällen, wo ein Paar correspondirender Ebenen ganz in einander fällt. Dann schneidet sich nämlich nothwendig jede in dieser Ebene liegende Visirlinie des einen Auges mit der correspondirenden des andern und giebt einen Punkt der Horoptercurve, der in der Ebene liegt. Sollten die Visirlinien parallel laufen, so geben sie unendlich entfernte Punkte dieser Curve. Dann ist also ein Theil der Horoptercurve eine ebene Curve oder eine gerade Linie. Ist das erstere der Fall, und machen wir irgend einen Punkt dieser Curve zum Mittelpunkt eines durch die Horoptercurve gelegten Kegels, so wird ein Theil dieser Kegelfläche eine Ebene, der Rest der Kegelfläche kann dann nur eine zweite Ebene sein. Denn nur der Grenzfall, wo der Kegel in zwei sich schneidende Ebenen übergeht, erlaubt, dass ein Theil der Kegeloberfläche eben sei. Wenn diese anderen Ebenen, die nicht durch die dem Horopter angehörige ebene Curve gehen, eine gemeinsame Schnittlinie haben, so kann diese nur eine gerade Linie sein, die durch einen Punkt der erwähnten ebenen Curve gehen muss. Zugleich folgt, dass die Curve eine Curve zweiten Grades sein muss, denn nur unter dieser Bedingung können die Kegel, welche ihre Spitze in der geraden Linie haben, Kegel zweiten Grades sein.

Ist zweitens die Schnittcurve der correspondirenden Visirlinien eine gerade Linie, so folgt, dass jeder Kegel, der einen ausserhalb dieser geraden Linie liegenden Theil der Horoptercurve zur Spitze hat, einen ebenen Theil hat, folglich aus zwei Ebenen besteht, und dass daher der Rest der Horoptercurve eine ebene Curve sein müsse.

Auch ist leicht einzusehen, dass wenn die Horoptercurve aus einer geraden Linie und einem Kegelschnitt besteht, die Augenmittelpunkte in dem letzteren liegen müssen und die Ebene desselben ein correspondirendes und zusammenfallendes Ebenenpaar beider Augen darstellt. Denn es kann nicht ein Auge in der Curve, ein anderes in der geraden Linie liegen; sonst würde ein Bündel von Visirlinien des ersteren, welches nach den Punkten der Curve geht und daher in einer Ebene liegt, im zweiten in einer gekrümmten Kegeloberfläche liegen, was nicht angeht. Und sollten beide Augen in der geraden Linie liegen, so müsste diese ein Paar correspondirender Visirlinien vertreten, und giebt es dann ausserhalb dieser geraden Linie noch irgend einen Punkt der Horoptercurve, z. B. den Fixationspunkt, so wäre die durch ihn und die Augen gelegte Ebene Vertreterin eines correspondirenden Ebenenpaars und müsste eine Horoptercurve enthalten.

Die Bedingung für die Zusammensetzung der Horoptercurve aus einem ebenen Kegelschnitt und einer diesen schneidenden geraden Linie ist also, dass es Werthe von l, m, n giebt, für welche die Gleichungen

$$lA + mB + nC = 0$$
$$l\mathfrak{A} + m\mathfrak{B} + n\mathfrak{C} = 0$$

identisch werden. Bringt man mittels der Gleichungen 5a) und 5b) diese Gleichungen auf die Form

$$f\mathfrak{x} + f_1\mathfrak{y} + f_2\mathfrak{z} + f_3 = 0$$
$$\varphi\mathfrak{x} + \varphi_1\mathfrak{y} + \varphi_2\mathfrak{z} + \varphi_3 = 0,$$

so muss sein

$$\frac{f}{\varphi} = \frac{f_1}{\varphi_1} = \frac{f_2}{\varphi_2} = \frac{f_3}{\varphi_3}.$$

Der letzte Bruch ist unabhängig von l, m, n; in den drei ersten sind Zähler und Nenner lineare Functionen von l, m, n. Indem man jeden der drei ersten Brüche dem letzten gleich setzt, erhält man drei lineare Gleichungen für l, m, n ohne constantes Glied, und daraus folgt, dass die Determinante der Coefficienten von l, m, n gleich Null sein muss. Dies giebt eine Gleichung zwischen den Grössen a, a_1, ϑ, ϑ_1 und γ, welche erfüllt sein muss, wenn die Horoptercurve die oben angegebene Gestalt erhalten soll. Es ist nicht nöthig, diese Rechnung hier durchzuführen, da uns nur diejenigen Stellungen der Augen näher interessiren, die nach dem Listing'schen Gesetze möglich sind.

Geometrisch lässt sich die Bedingung hierfür folgendermassen ausdrücken. Bezeichnen wir die Linie, welche die beiden Mittelpunkte der Visirlinien verbindet, mit F. Diese Linie kann sowohl als eine der Visirlinien des rechten Auges, wie als eine des linken betrachtet werden. Im ersteren Sinne muss es zu ihr eine correspondirende Visirlinie H im linken Auge geben, im zweiten Sinne eine correspondirende G im rechten Auge. Wenn G und H sich schneiden, so liegen sie mit F in einer Ebene, welche dann für beide Augen correspondirend liegt, da zwei Paar correspondirender Visirlinien in ihr liegen, F und G für das rechte, F und H für das linke Auge. Bei jeder Stellung der Augen wird es also möglich sein, durch Drehung des einen um seine Gesichtslinie eine Stellung herbeizuführen, welche der Horoptercurve die gewünschte einfache Gestalt giebt.

Für Augen, welche dem Gesetze von LISTING folgen, symmetrisch gebildet sind und deren Netzhauthorizonte bei parallelen Blicklinien in der Visirebene liegen, ist es klar, dass die genannte Bedingung erfüllt ist, erstens bei den symmetrischen Stellungen der Augen, wo die Linien G und H auch symmetrisch liegen und sich daher in der Medianebene schneiden müssen, zweitens wenn die Visirebene sich in ihrer Primärstellung befindet, weil dann die einander correspondirenden Netzhauthorizonte in ihr liegen. Es sind dies übrigens theoretisch nicht die einzigen Fälle der Art, sondern es würden für Augen, die dem LISTING'schen Gesetze genau folgen, in nach unten und seitlich gerichteten Stellungen noch gewisse sehr grosse Entfernungen des Fixationspunktes existiren, in denen die Visirebene für beide Augen correspondirend wäre und daher eine ebene Ellipse als Horoptercurve enthalten müsste. Von irgend welcher praktischer Wichtigkeit sind aber diese Fälle nicht, da bei sehr grossen Entfernungen des Fixationspunktes überhaupt die Beobachtungen über die Lage der einfach gesehenen Punkte zu unbestimmt werden. In Augen, wo die Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane fehlt, rücken die erwähnten Lagen des Fixationspunktes in unendliche Entfernung hinaus.

Mit Auslassung kleiner Grössen ist in solchen Fällen die Entfernung ϱ des Fixationspunktes von dem Mittelpunkte eines mitten zwischen den Augen gelegenen ideellen Auges, wenn α der Erhebungswinkel, γ der Seitenwendungswinkel dieses Auges wäre, a der halbe Abstand der wirklichen Augen, ε die halbe Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane von einander

$$\varrho = \pm \frac{a \cos \gamma}{\sin \varepsilon \sin \beta \cos \beta}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}.$$

In der Nähe der Medianebene, wo $\gamma = 0$ und in der Nähe der Primärlage der Visirebene, wo $\alpha = 0$, wird $\beta = 0$ und ϱ unendlich lang. Positive Werthe hat es nur für ein negatives α, also unterhalb der Visirebene.

Wir wollen jetzt die beiden erst erwähnten Fälle behandeln, in denen der Horopter aus einer geraden Linie und einer ebenen Curve besteht, Fälle, welche eine gewisse Wichtigkeit für die Beobachtungen haben.

A. Der Fixationspunkt liegt in der Medianebene in unendlicher Entfernung. Dann wird in den Gleichungen 5a) und 5b)

$$a = a_1 \qquad \vartheta = -\vartheta_1$$

$$\left.\begin{aligned}
A &= -\mathfrak{x} \sin\gamma \sin\vartheta + \mathfrak{y} \cos\gamma \sin\vartheta + \mathfrak{z} \cos\vartheta \\
B &= -\mathfrak{x} \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) + \mathfrak{y} \cos\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) - \mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon) \\
C &= a - \mathfrak{x} \cos\gamma - \mathfrak{y} \sin\gamma \\
\mathfrak{A} &= -\mathfrak{x} \sin\gamma \sin\vartheta - \mathfrak{y} \cos\gamma \sin\vartheta + \mathfrak{z} \cos\vartheta \\
\mathfrak{B} &= \mathfrak{x} \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) + \mathfrak{y} \cos\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) + \mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon) \\
\mathfrak{C} &= a - \mathfrak{x} \cos\gamma + \mathfrak{y} \sin\gamma
\end{aligned}\right\} \ldots 6).$$

Zusammenfallende correspondirende Ebenen finden sich, wenn wir setzen

$$A \sin\gamma + C \cos\gamma \sin\vartheta = 0$$

$$\mathfrak{A} \sin\gamma + \mathfrak{C} \cos\gamma \sin\vartheta = 0,$$

denn beide Gleichungen geben identisch, vorausgesetzt, dass nicht $\sin\gamma$ und $\sin\vartheta$ gleichzeitig gleich Null sind:

$$\mathfrak{x}\sin\vartheta - \mathfrak{z}\sin\gamma\cos\vartheta - a\cos\gamma\sin\vartheta = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6\text{a}).$$

Dies ist also die Ebene des Kegelschnitts. Ferner wird für

$$\mathfrak{y} = 0 \quad \text{und} \quad \mathfrak{x}\sin\gamma\cos(\vartheta+\varepsilon) = -\mathfrak{z}\sin(\vartheta+\varepsilon) \quad . \quad . \quad . \quad 6\text{b})$$

$$A = \mathfrak{A} = -\mathfrak{x}\sin\gamma\sin\vartheta + \mathfrak{z}\cos\vartheta$$

$$B = \mathfrak{B} = 0$$

$$C = \mathfrak{C} = a - \mathfrak{x}\cos\gamma.$$

Also sind die Punkte der durch die Gleichungen 6b) gegebenen geraden Linie für beide Augen correspondirend, und jene Linie ist die gerade Horopterlinie.

Ihr parallel müssen die Kanten des Cylinders sein, auf dem die Horopterlinie liegt, und diejenigen Ebenen, die sich in den Cylinderkanten schneiden. Bildet man die Gleichung der correspondirenden Ebenen:

$$A\cos\gamma\sin(\vartheta+\varepsilon) - C\sin\gamma\cos\varepsilon = 0$$

$$\mathfrak{A}\cos\gamma\sin(\vartheta+\varepsilon) - \mathfrak{C}\sin\gamma\cos\varepsilon = 0,$$

so reduciren sich diese für $\mathfrak{y} = 0$ auf

$$\frac{a\tang\gamma\cos\varepsilon}{\cos\vartheta} - \mathfrak{x}\sin\gamma\cos(\vartheta+\varepsilon) - \mathfrak{z}\sin(\vartheta+\varepsilon) = 0.$$

Ihre Schnittlinie ist also, wie man aus der Vergleichung mit 6b) sieht, der geraden Horopterlinie parallel und liegt wie diese in der Medianebene.

Andererseits schneiden sich in der geraden Horopterlinie gemäss 6b) die Ebenen

$$B = \mathfrak{B} = 0$$

und die correspondirenden Ebenen

$$A\cos\gamma\sin(\vartheta+\varepsilon) + \varkappa B - C\sin\gamma\cos\varepsilon = 0$$

$$\mathfrak{A}\cos\gamma\sin(\vartheta+\varepsilon) + \varkappa\mathfrak{B} - \mathfrak{C}\sin\gamma\cos\varepsilon = 0$$

schneiden sich also ebenfalls in Linien, die der geraden Horopterlinie parallel sind. Eliminirt man aus ihnen $\varkappa$, so erhält man

$$(A\mathfrak{B} - B\mathfrak{A})\cos\gamma\sin(\vartheta+\varepsilon) - (\mathfrak{B}C - B\mathfrak{C})\sin\gamma\cos\varepsilon = 0$$

als Gleichung des Cylinders. Diese Gleichung reducirt giebt:

$$\left.\begin{aligned}\frac{a^2\sin^2\gamma\cos^2\varepsilon}{4\cos^2\gamma\cos^2\vartheta} &= \mathfrak{y}^2\left[\sin^2\gamma\cos^2(\vartheta+\varepsilon) + \frac{\sin\vartheta\cdot\sin 2(\vartheta+\varepsilon)}{2\cos\vartheta}\right]\\ &+ \left[\mathfrak{x}\sin\gamma\cos(\vartheta+\varepsilon) + \mathfrak{z}\sin(\vartheta+\varepsilon) - \frac{a\sin\gamma\cos\varepsilon}{2\cos\gamma\cos\vartheta}\right]^2\end{aligned}\right\} \; 6\text{c}).$$

Es ist dies die Gleichung eines Cylinders, welcher die Ebenen $\mathfrak{z} = \text{Const.}$ schneidet in Kegelschnitten, deren $\mathfrak{x}$ Axe stets reell ist, nämlich

$$X = \frac{a\cos\varepsilon}{2\cos\gamma\cos\vartheta\cos(\vartheta+\varepsilon)}.$$

Die $\mathfrak{y}$ Axe dagegen ist dies nicht nothwendig, ihr Quadrat ist

$$Y^2 = \frac{a^2 \operatorname{tang}^2\gamma \cos^2\varepsilon}{4 \cos\vartheta \cos(\vartheta + \varepsilon) [\sin^2\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) \cos\vartheta + \sin\vartheta \sin(\vartheta + \varepsilon)]}.$$

In diesem Ausdrucke werden $\cos\vartheta$ und $\cos(\vartheta + \varepsilon)$ für die ausführbaren Augenbewegungen immer positiv sein. Wenn aber $\operatorname{tang}\vartheta \operatorname{tang}(\vartheta + \varepsilon)$ negativ wird und sein absoluter Werth dabei grösser als der von $\sin^2\gamma$, so wird Y imaginär und der Schnitt eine Hyperbel. Da ε der Regel nach einen kleinen positiven Werth hat, so muss ϑ zu diesem Zwecke noch kleinere negative Werthe haben, was nur bei abwärts gerichteten Gesichtslinien und weiter Entfernung des Fixationspunktes eintreten kann.

Die YAxe dieses in der Visirebene liegenden Kegelschnitts fällt mit der der ebenen Horoptercurve zusammen; um die mediane Axe der letzteren zu finden, setze man den Werth von $\mathfrak{z}$ aus der Gleichung 6 a) in 6 c) und zugleich $\mathfrak{y} = 0$, so kann man für das eine und andere Ende der betreffenden Axe die Coordinaten $\mathfrak{x}_0$, $\mathfrak{z}_0$ und $\mathfrak{x}_1$, $\mathfrak{z}_1$ finden. Die Grösse der stets reellen Axe X_1 ist dann gegeben durch die Gleichung

$$X_1^2 = \frac{1}{4}(\mathfrak{x}_1 - \mathfrak{x}_0)^2 + \frac{1}{4}(\mathfrak{z}_1 - \mathfrak{z}_0)^2$$

$$= \frac{a^2 \sin^2\gamma \cos^2\varepsilon (\sin^2\gamma \cos^2\vartheta + \sin^2\vartheta)}{4 \cos^2\gamma \cos^2\vartheta [\sin^2\gamma \cos\vartheta \cos(\vartheta + \varepsilon) + \sin\vartheta \cdot \sin(\vartheta + \varepsilon)]^2}$$

und es findet sich

$$\frac{X_1^2}{Y^2} = \frac{\sin^2\gamma + \operatorname{tang}^2\vartheta}{\sin^2\gamma + \operatorname{tang}\vartheta \cdot \operatorname{tang}(\vartheta + \varepsilon)}.$$

Man kann zur Construction der Horoptercurve statt des bisher betrachteten Cylinders auch den Kegel des Verticalhoropters

$$B\mathfrak{C} - \mathfrak{B}C = 0$$

benutzen, oder

$$[\mathfrak{x} \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) + \mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon)] [a - \mathfrak{x} \cos\gamma] - \mathfrak{y}^2 \cos\gamma \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) = 0$$

für $\mathfrak{z} = 0$, das heisst in der Visirebene, ist die Schnittlinie ein Kreis, gegeben durch folgende Gleichung:

$$\left(\mathfrak{x} - \frac{a}{2\cos\gamma}\right)^2 + \mathfrak{y}^2 = \frac{a^2}{4\cos^2\gamma}.$$

Dieser Kreis geht durch die Punkte

$$\mathfrak{x} = 0 \qquad \mathfrak{y} = 0$$

$$\mathfrak{x} = \frac{a}{\cos\gamma}, \qquad \mathfrak{y} = 0$$

$$\mathfrak{x} = a\cos\gamma \qquad \mathfrak{y} = a\sin\gamma$$

$$\mathfrak{x} = a\cos\gamma \qquad \mathfrak{y} = -a\sin\gamma.$$

Die zwei ersten sind der Fixationspunkt und der ihm diametral gegenüber liegende Punkt, die beiden andern sind die Mittelpunkte beider Augen. Dadurch ist dieser Kreis gegeben.

Der Kegel schneidet die Medianebene, $\mathfrak{y} = 0$, in den beiden Linien

$$\mathfrak{x} \sin\gamma \cos(\vartheta + \varepsilon) = - \mathfrak{z} \sin(\vartheta + \varepsilon)$$
$$\mathfrak{x} \cos\gamma = a.$$

Ersteres ist die gerade Horopterlinie, die zweite ist senkrecht zur Visirebene und schneidet diese in dem dem Fixationspunkt diametral gegenüberliegenden Punkte des Kreises. Die Ordinaten der Spitze des Kegels sind also

$$\mathfrak{x} = \frac{a}{\cos\gamma}$$
$$\mathfrak{z} = - a \operatorname{tang}\gamma \cdot \operatorname{cotang}(\vartheta + \varepsilon).$$

Um die Lage der betreffenden Linien und Ebenen zu finden für Augen, welche dem Gesetze von Listing folgen, setzen wir den Erhebungswinkel zwischen der Primärlage der Visirebene und ihrer actuellen Lage gleich β, und haben dann

$$\operatorname{tang}\vartheta = \frac{\sin\gamma \sin\beta}{\cos\gamma + \cos\beta} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7).$$

Die Gleichung 6a) für die Ebene der Horoptercurve wird dann

$$(\mathfrak{x} - a\cos\gamma) - \mathfrak{z}\,\frac{\cos\gamma + \cos\beta}{\sin\beta} = 0 \quad \ldots\ldots \quad 7a).$$

Die Gleichungen für die Primärrichtung der Gesichtslinien sind unter diesen Umständen:

$$\mathfrak{y} = \pm a \sin\gamma \quad \text{und} \quad \mathfrak{z} = (\mathfrak{x} - a\cos\gamma)\operatorname{tang}\beta \quad \ldots\ldots \quad 7b).$$

Die Gleichungen für die actuellen Lagen der Blicklinien sind

$$\mathfrak{z} = 0 \quad \text{und} \quad \mathfrak{y} = \pm \mathfrak{x} \operatorname{tang}\gamma \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7c).$$

Der Fixationspunkt ist auf den letzteren Linien in der Entfernung a von den Mittelpunkten der Augen. Schneiden wir auch auf den Linien 7b) einen Punkt in der Entfernung a vom Mittelpunkte des betreffenden Auges ab, so sind dessen Coordinaten

$$\mathfrak{x} = a(\cos\gamma - \cos\beta), \qquad \mathfrak{y} = \pm a\sin\gamma, \qquad \mathfrak{z} = - a\sin\beta \quad \ldots\ldots \quad 7d).$$

Die Coordinaten eines Punktes dagegen, der in der Mitte zwischen diesem Punkte 7d) und dem Fixationspunkte liegt, für welchen letzteren

$$\mathfrak{x} = 0 \qquad \mathfrak{y} = 0 \qquad \mathfrak{z} = 0$$

sind halb so gross als die Coordinaten 7d), also

$$\mathfrak{x} = \frac{1}{2} a(\cos\gamma - \cos\beta), \qquad \mathfrak{y} = \pm\frac{1}{2} a\sin\gamma, \qquad \mathfrak{z} = -\frac{1}{2} a\sin\beta \, .. \; 7e).$$

Diese letzteren Werthe erfüllen nun die Gleichung 7a) und es liegen also die beiden Punkte 7e) in der Ebene der Horoptercurve.

Die Ebene des Kegelschnitts, der der Horoptercurve angehört, wird also bei medianem Fixationspunkte gefunden, wenn man die Winkel, welche die primäre und die actuelle Lage jeder Blicklinie bilden, halbirt und durch die Halbirungslinie eine Ebene legt. Dieser Umstand ist bei der Construction auf Seite 717, *Fig. 207*, benutzt.

Wenn man ferner durch den Mittelpunkt jedes Auges eine Ebene legt, senkrecht zu der Verbindungslinie desselben Punktes mit dem zugehörigen Punkte der Gleichungen 7e), so ist deren Gleichung

$$(\mathfrak{x} - a\cos\gamma)(\cos\gamma + \cos\beta) - (a\sin\gamma \mp \mathfrak{y})\sin\gamma + \mathfrak{z}\sin\beta = 0 \quad \ldots\ldots \quad 7\text{f}).$$

Nimmt man hierzu noch die Gleichung einer Ebene, welche in der Entfernung $-a\sin\gamma\,\text{cotang}\,\varepsilon$ unterhalb der Primärlage der Visirebene 7d) liegt und deren Gleichung ist:

$$\mathfrak{z}\cdot\cos\beta + a\,\text{cotang}\,\varepsilon\cdot\sin\gamma = (\mathfrak{x} - a\cos\gamma)\sin\beta \quad \ldots \quad 7\text{g}),$$

so ergiebt sich, dass die Ebenen, welche durch die gerade Horopterlinie gehen, nämlich

$$\mathfrak{x}\sin\gamma + \mathfrak{z}\,\text{tang}\,(\vartheta + \varepsilon) = 0, \qquad \mathfrak{y} = 0$$

und die beiden Ebenen 7f) und 7g) durch einen Punkt gehen, da die Werthe von $\mathfrak{x}\,\mathfrak{y}\,\mathfrak{z}$ aus je drei dieser Gleichungen, mit Berücksichtigung von 7) in die vierte gesetzt, diese identisch machen. Darauf beruht die Construction der geraden Horopterlinie oben in *Fig. 208*.

B. Fixationspunkt in der Mittelebene in unendlicher Entfernung. Eine besondere Untersuchung verdient noch der Fall, wenn $\sin\gamma$ und $\sin\vartheta$ gleichzeitig gleich Null sind, ein Fall, den wir oben bei der Gleichung 6a) von der Untersuchung ausschliessen mussten. Es sind alsdann die Gesichtslinien einander parallel in die Ferne gerichtet. Die Entfernung a des Fixationspunktes und die Coordinate $\mathfrak{x}$ wird unendlich gross, aber die Grösse $a\sin\gamma$, welche die halbe Entfernung der Augen ist, bleibt constant, wir wollen sie mit b bezeichnen, und $\mathfrak{x} - a$ mit ξ. Dann wird

$$\begin{aligned} A &= \mathfrak{z} & \mathfrak{A} &= \mathfrak{z} \\ B &= -b\cos\varepsilon + \mathfrak{y}\cos\varepsilon - \mathfrak{z}\sin\varepsilon & \mathfrak{B} &= b\cos\varepsilon + \mathfrak{y}\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon \\ C &= -\xi & \mathfrak{C} &= -\xi. \end{aligned}$$

Dann sind also die Bedingungen der Correspondenz, dass

$$A = \mathfrak{A}, \qquad B = \mathfrak{B}, \qquad C = \mathfrak{C}$$

vollständig erfüllt für alle Punkte für welche

$$b\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon = 0.$$

Dies sind die Punkte einer Ebene, die in der Entfernung $-b\,\text{cotang}\,\varepsilon$ unterhalb der Visirebene liegt. Diese bildet also in diesen Fällen den Horopter.

C. Der Fixationspunkt liegt in der Primärlage der Visirebene. Nach dem Listing'schen Gesetze wird

$$\vartheta = \vartheta' = 0$$

und also nach 5a) und 5b)

$$\left.\begin{aligned} A &= \mathfrak{z} \\ B &= -\mathfrak{x}\sin\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos\varepsilon - \mathfrak{z}\sin\varepsilon \\ C &= a - \mathfrak{x}\cos\gamma - \mathfrak{y}\sin\gamma \\ \mathfrak{A} &= \mathfrak{z} \\ \mathfrak{B} &= \mathfrak{x}\sin\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{y}\cos\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon \\ \mathfrak{C} &= a_1 - \mathfrak{x}\cos\gamma + \mathfrak{y}\sin\gamma \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 8).$$

Der Kegel

$$A\mathfrak{C} - \mathfrak{A}C = 0$$

wird

$$\mathfrak{z}\,[a_1 - a + 2\mathfrak{y}\sin\gamma] = 0 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8\,a)$$

und zerfällt also in die beiden Ebenen

$$\mathfrak{z} = 0 \quad \text{und} \quad \mathfrak{y} = \frac{a - a_1}{2\sin\gamma} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8\,b).$$

Die Fläche

$$A\mathfrak{B} - \mathfrak{A}B = 0$$

wird

$$2\mathfrak{z}\,[\mathfrak{x}\sin\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon] = 0$$

und zerfällt also in die beiden Ebenen

$$\mathfrak{z} = 0 \quad \text{und} \quad \mathfrak{x}\sin\gamma + \mathfrak{z}\,\mathrm{tang}\,\varepsilon = 0 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 8\,c).$$

Die Fläche endlich

$$B\mathfrak{C} - \mathfrak{B}C = 0$$

wird

$$-(\mathfrak{x}\sin\gamma\cos\varepsilon + \mathfrak{z}\sin\varepsilon)\,(a_1 + a - 2\mathfrak{x}\cos\gamma) + 2\mathfrak{y}^2\cos\gamma\sin\gamma\cos\varepsilon$$
$$+ (a_1 - a)\,\mathfrak{y}\cos\gamma\cos\varepsilon = 0,$$

was die Gleichung eines Hyperboloids ist. Die Schnittlinie desselben mit der Ebene $\mathfrak{z} = 0$ ist

$$\left(\mathfrak{x} - \frac{a + a_1}{4\cos\gamma}\right)^2 + \left(\mathfrak{y} + \frac{a_1 - a}{4\sin\gamma}\right)^2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{a^2 + a_1^2 - 2aa_1\cos 2\gamma}{(\sin 2\gamma)^2}$$

ein Kreis, welcher durch die Punkte

$$\mathfrak{x} = 0 \qquad \mathfrak{y} = 0$$
$$\mathfrak{x} = a\cos\gamma \qquad \mathfrak{y} = a\sin\gamma$$
$$\mathfrak{x} = a_1\cos\gamma \qquad \mathfrak{y} = -a_1\sin\gamma$$

hindurchgeht, der MÜLLER'sche Horopterkreis.

Die gerade Linie des Horopters ist demgemäss die durch die beiden unter 8 b) und 8 c) aufgeführten Gleichungen gegebene Linie

$$\mathfrak{y} = \frac{a - a_1}{2\sin\gamma} \quad \text{und} \quad \mathfrak{x}\sin\gamma + \mathfrak{z}\,\mathrm{tang}\,\varepsilon = 0.$$

Ihr Schnittpunkt mit der Visirebene liegt auch im Horopterkreise, sie läuft der Medianebene $\mathfrak{y} = 0$ parallel. Die Entfernung des Schnittpunktes von den beiden Augenmittelpunkten ist die gleiche, nämlich

$$\frac{\sqrt{a^2 - 2aa_1\cos 2\gamma + a_1^2}}{2\sin\gamma} = \frac{b}{\sin\gamma},$$

wenn wir die halbe Distanz der Augen von einander mit b bezeichnen. Macht man

$$\mathfrak{x} = \frac{b}{\sin\gamma},$$

so wird

$$\mathfrak{z} = -\frac{b}{\mathrm{tang}\,\varepsilon}.$$

Diese letztere Grösse ist aber die Entfernung der Horopterfläche unter der Visirebene, wenn beide Gesichtslinien der Medianebene parallel sind, und so ergiebt sich die oben angegebene Construction der geraden Horopterlinie.

Die Frage über den Grund des Einfach- und Doppelsehens ist schon sehr alt. Schon Galenus [1] (geb. 113 p. C.) machte zur Erklärung des ersteren die Annahme, dass sich Sehnervenfasern im Chiasma der Sehnerven verbänden. Dieser anatomischen Hypothese schlossen sich später an I. Newton [2], Rohault [3], Hartley [4], W. H. Wollaston [5], Joh. Müller [6]. Eine zweite Ansicht suchte die Schwierigkeit durch die Annahme zu beseitigen, dass wir immer nur mit einem Auge auf einmal sähen. Dieser Meinung war Porta [7]. Ihm schlossen sich Gassendi [8], Tacquet, Gall und du Tour [9] an. Letzterer berief sich dabei namentlich auf die Phänomene des Wettstreits zwischen beiden Gesichtsfeldern und beschränkte die Annahme auch dahin, dass bald gleichzeitig mit beiden Augen, bald nur mit einem gesehen werden sollte.

Die dritte davon verschiedene Ansicht war die sogenannte Projectionstheorie, wobei das Einfachsehen für einen Act unseres Verständnisses der Gesichtsempfindungen erklärt wird. In ihrem Sinne äussert sich schon Keppler [10]; mit ihm gleichzeitig stellte Aguilonius [11] die Theorie auf, dass wir die Gesichtsbilder immer auf eine gewisse durch den Fixationspunkt gehende Ebene projicirten, die er den Horopter nannte, und dass sie einfach oder doppelt erschienen, je nachdem ihre Projection einfach oder doppelt wäre. Näher an Keppler's Ansicht schliesst sich Porterfield an, indem er meint, wir sähen die Objecte nicht doppelt, weil jedes Auge sie an ihren richtigen Platz verlegt; was später dann so formulirt wurde, dass wir sie in den Kreuzungspunkt der Visirlinien verlegen. In dieser Form ausgesprochen, würde das Gesetz mit der Existenz der Doppelbilder im Widerspruch sein. Porterfield erwähnt wohl solche, die bei einer durch Druck oder Zerrung herbeigeführten Zwangsstellung des Auges eintreten, setzt hier aber voraus, dass ein Irrthum über die Stellung des Auges stattfinde.

Diese drei Ansichten liegen auch den neueren Theorien meist mehr oder weniger vermischt zum Grunde; ein wesentlicher Fortschritt geschah aber durch genauere Untersuchungen der thatsächlichen Verhältnisse.

Das Gesetz der Erscheinungen wurde zuerst genauer und im Wesentlichen richtig von J. Müller [12] formulirt, indem er das Einfachsehen und Doppeltsehen davon abhängig machte, ob sich die Bilder des betreffenden Punktes auf identische oder nicht identische Punkte beider Netzhäute entwerfen. Für die Lage der identischen Punkte gab er die der Hauptsache nach richtige Regel, dass sie von der Mitte der Netzhäute in gleicher Richtung gleich weit entfernt lägen. Er spricht sich dabei nicht mit Bestimmtheit für eine besondere anatomische Hypothese (Vereinigung der identischen Fasern im Chiasma der Sehnerven oder im Gehirn) aus, behauptet aber, der Grund der Identität müsse ein organischer sein.

Genauere Bestimmungen der Lage der identischen oder correspondirenden Punkte wurden später namentlich von Volkmann [13] gegeben. Mit der beobachteten Lage der identischen Punkte war aber die Annahme des Aguilonius, dass der Horopter eine Ebene sei, unverträglich. Schon Vieth [14] und Joh. Müller hatten eingesehen, dass sein Schnitt mit der Visir-

---

[1] De usu partium. Lib. X, cap. 12.
[2] *Opticks.* 1717. p. 320. Query 15.
[3] *Traité de physique.* Paris 1671 und 1682. Part. I, cap. 31.
[4] *Observations on man.* I, 207.
[5] *Phil. Trans.* 1824. I, 222.
[6] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1826.
[7] De refractione. p. 142. 1593.
[8] Opera. Vol. II, p. 395.
[9] *Acta Paris.* 1743. p. 334. *Mém. des savants étrang.* III, 514. IV, 499. V, 677.
[10] Dioptrice. Propos. LXII.
[11] Opticorum Libri VI. Antwerp. 1613.
[12] Beiträge zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig 1826. p. 71. Lehrbuch der Physiologie. 1840. II, 376—87.
[13] Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik von A. W. Volkmann. Zweites Heft. Leipzig 1864.
[14] Gilbert's Annalen. LVIII, 233.

ebene ein durch den Fixationspunkt und die beiden Augen gehender Kreis sein müsse. Später zeigten A. P. Prevost [1] und Burckhardt, dass in den Augenstellungen ohne Raddrehung zu dem Müller'schen Kreise noch eine gerade Linie komme, dass der Horopter also überhaupt im Allgemeinen keine Fläche sei. Hering [2] erwies, dass der Horopter im Allgemeinen immer eine Linie sein müsse; damit war seine Bedeutung im Sinne des Aguilonius aufgehoben. Die allgemeine Lösung des Horopterproblems, welche noch die Kenntniss des Augenbewegungsgesetzes erfordert und übrigens eine rein mathematische Aufgabe war, habe ich selbst und Herr E. Hering fast gleichzeitig gegeben [3]. Daran schliesst sich dann noch eine Arbeit von H. Hankel [4], in welcher eine ausführlichere analytische Behandlung des Problems gegeben ist, aber ohne Berücksichtigung der hier sehr einflussreichen Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane.

Daneben ist dann seit Wheatstone's Erfindung des Stereoskops die Aufmerksamkeit der Forscher hauptsächlich mit der Verschmelzung der Doppelbilder beschäftigt gewesen, weil sich an diese namentlich die theoretischen Fragen anknüpfen über die Art des Zusammenwirkens beider Augen. Diese theoretischen Fragen können wir erst am Schlusse des nächsten Paragraphen besprechen. Den grossen Einfluss, welchen die Bewegung der Augen auf die Verschmelzung der disparaten Bilder körperlicher Objecte und stereoskopischer Zeichnungen habe, zeigte zunächst Brücke [5]; dass dagegen eine solche Verschmelzung auch bei absoluter Vermeidung aller Augenbewegungen doch auch vorkommen kann (wenn auch in viel geringerem Grade), bewies Dove [6] durch Anwendung der elektrischen Beleuchtung, Beobachtungen, welche später durch Volkmann [7], August [8], Recklinghausen [9] mit abgeänderten Methoden wiederholt und bestätigt wurden. Ueber die Grenze und die Bedingungen der Verschmelzung enthalten namentlich die Arbeiten von Panum [10] und Volkmann [11] eine grosse

[1] *Essai sur la théorie de la vision binoculaire.* Genève 1843; und Poggendorff's Ann. 1844. Bd. LXII, S. 548.

[2] Beiträge zur Physiologie. Heft III, S. 196—199. Leipzig 1863. Heft IV, 1864.

[3] Meine erste Mittheilung wurde gemacht der naturhistorisch medicinischen Gesellschaft zu Heidelberg am 24. October 1862, das Manuscript eingereicht am 8. November 1862. Darin sind zum ersten Male Gleichungen für die Form des Horopters im allgemeinen Falle gegeben, freilich noch nicht in ihrer einfachsten Form, indem er als Schnittlinie einer Fläche zweiten und einer vierten Grades ausgedrückt ist. Auch ist darin noch nicht die Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane berücksichtigt. Die Gestalt des Horopters im allgemeinen Falle ist darin kurz beschrieben. Ehe diese nur als vorläufige betrachtete Mittheilung durch den Druck veröffentlicht war (Herbst 1863), erschien das 3. Heft der Beiträge zur Physiologie von Herrn E. Hering, worin der Nachweis geführt war, dass der Horopter jedenfalls immer mindestens eine Linie (wenn nicht Fläche) sein müsse, die Gestalt desselben aber nur für die schon früher behandelten einfacheren Fälle wirklich bestimmt war. Dann folgte mein Aufsatz über den Horopter im Archiv für Ophthalmologie X, 1, S. 1—60, dessen Correctur schon Mitte März 1864 vollendet war, worin der Horopter als Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades dargestellt und der Einfluss der Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane erörtert ist. Ohne Kenntniss dieser Arbeit zu haben, hat Herr E. Hering im Juni 1864 sein 4. Heft zum Druck gesendet, welches ebenfalls die Rückführung auf die Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades enthält mit Benutzung der hierzu sehr geeigneten Steiner'schen Geometrie. Die dabei gegen meine erste Arbeit gerichtete Kritik beruht wesentlich auf dem Missverständnisse, dass ich von dem geredet habe, was ich oben Horopter, Herr Hering von dem, was ich die Horoptercurve genannt habe, und dass beides nicht ganz identisch ist, wie ich in Poggendorff's Annalen CXXIII S. 158—161 auseinandergesetzt habe. Endlich enthält das 5. Heft von Hering's Beiträgen wieder eine Kritik meiner zweiten Arbeit, aus der ich nur einen Punkt (S. 350) erwähnen will, in welchem Herr Hering in der That Recht hat; dass nämlich auf S. 44 meiner Abhandlung der Winkel η allgemein gleich η_1 gesetzt worden ist. Es ist das eine Flüchtigkeit, die mir bei der letzten, vor einer Reise sehr eilig gemachten Ueberarbeitung des Aufsatzes untergelaufen ist, in dem Streben die mathematische Abtheilung möglichst zusammenzudrängen. Ich hatte vorher die beiden Fälle, in denen jene Behauptung richtig ist, einzeln behandelt und der Fehler hat also auch weiter keinen Einfluss auf die Richtigkeit der Consequenzen. Die übrigen Ausstellungen, welche Herr Hering macht, haben theils nur persönliches Interesse, und werden von Lesern, die sich für dergleichen interessiren sollten, ohne weitere Erörterungen meinerseits leicht erledigt werden, theils können sie nur durch vielfach wiederholte Beobachtungen vieler Individuen entschieden werden. Was ich von solchen habe beibringen können, ist oben geschehen.

[4] Poggendorff's Annalen. CXXII, 575—588.

[5] Müller's Archiv für Anat. und Physiol. 1841. S. 459.

[6] Monatsber. d. Berl. Akad. 1841, 29. Juli.

[7] Leipz. Berichte. 1859, S. 90—98.

[8] Pogg. Ann. CX, 582—593.

[9] Ebenda. CXIV, 170—173.

[10] Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kie 1858; und in Reichert und du Bois Reymond Archiv. 1861. 63—227.

[11] Archiv für Ophthalmologie. II, 2, 1—100; und Physiol. Untersuchungen im Gebiete der Optik. Heft II.

Menge sorgfältig gemachter Beobachtungen und Messungen. Der viel bestrittene Versuch von Wheatstone, wonach die Eindrücke identischer Punkte zur Ausfüllung verschiedener Stellen des Anschauungsbildes von den wahrgenommenen körperlichen Objecten gebraucht werden können, wurde einerseits bestätigt durch Nagel [1] und Wundt [2]. Andererseits wurde dagegen hervorgehoben, dass man bei hinreichender Aufmerksamkeit und Anwendung passender Mittel, um die Doppelbilder leichter sichtbar zu machen, auch immer die Bilder getrennt sehen könne, von Volkmann [3], E. Hering [4], W. Bezold [5]. Dass beides nicht nothwendig im Widerspruch steht, habe ich oben erörtert.

---

113. Galenus. De usu partium. Lib. X, c. 12.
1593. Porta. De refractione. p. 142.
1611. Keppler. Dioptrice. Propos. LXII.
1613. Aguilonius. Opticorum libri VI. Antwerp.
1658. Gassendi. Opera. Vol. II, p. 395.
1669. Tacquet. Opera mathematica.
1671. Rohault. *Traité de physique.* Paris 1671 und 1682. Part. I, cap. 31.
1704. I. Newton. Optice. Quaestro XXV.
1743. Du Tour. *Act.* Paris 1743 p. 334.
1759. Porterfield. *On the eye.* II, 285.
1760. Du Tour. *Pourquoi un objet sur lequel nous fixons les yeux, paroit-il unique? Mém. des savants étrang.* III, 514. IV, 499. V, 677.
1818. G. U. A. Vieth. Ueber die Richtung der Augen. Gilbert's Ann. LVIII, 233.
1824. W. H. Wollaston. *On the semi-decussation of the optic nerves. Phil. Transact.* 1824. I, 222. *Edinb. Phil. Journ.* XXII, 420. *Annals of Philos.* 1824, April, p. 306.
1826. Joh. Müller. Beiträge zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig.
1827. Tourtual. Die Sinne des Menschen. p. 234.
1838. Ch. Wheatstone. *On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision. Phil. Transact.* 1838. P. II, p. 384—385.
1840. Joh. Müller. Handbuch der Physiologie des Menschen. Coblenz. Bd. II, S. 376—387.
1841. E. Brücke. Ueber die stereoskopischen Erscheinungen in J. Müller's Archiv für Anat. und Physiol. 1841. S. 459.
— Dove. Berl. Monatsb. 1841, 29. Juli.
1843. A. P. Prévost. *Essai sur la théorie de la vision binoculaire.* Genève. Auch in Poggendorff's Ann. 1844. LXII, 548.
1844. D. Brewster. *Law of visible position in single and binocular vision. Edinb. Phil. Trans.* XV.
1849. Locke. *On single and double vision. Phil. Mag.* XXXIV, 195. *Silliman Amer. J.* VII, 68.
— Lathrop. *Results additional to those offered by* Dr. Locke. *Silliman Journ.* VII. 343.
1852. A. Müller. Ueber das Beschauen der Landschaften mit normaler und abgeänderter Augenstellung. Pogg. Ann. LXXXVI, 147—152. *Cosmos.* I, 336.
— D. Brewster. *Sur la vision binoculaire et le stéréoscope. North-British Review.* 1853, May. *Cosmos.* I, 422—425; 450—453.
1854. A. v. Graefe. Ueber Doppeltsehen nach Schieloperationen und Incongruenz der Netzhäute. Archiv für Ophthalmol. I, 1, p. 82—120.
— F. Burckhardt. Ueber Binocularsehen. Verhandl. der naturf. Ges. in Basel. I, 123—154.
— Meissner. Physiologie des Sehorgans. Leipzig 1854.
1855. H. Emsmann. Ueber Doppeltsehen. Pogg. Ann. XCVI, 588—602.
— W. B. Rogers. *Observations on binocular vision. Silliman J.* (2) XX, 86—98; 204—220; 318—335. XXI, 80—95; 173—189; 439. *Cosmos.* VIII, 229—230. *Arch. des sc. phys.* XXX, 247—249. *Edinb. J.* (2) III, 210—217.

---

[1] Das Sehen mit zwei Augen. Leipzig und Heidelberg 1861.
[2] Henle und Pfeuffer Zeitschr. für ration. Medicin. (3) XII, 249.
[3] Archiv für Ophthalmol. II, 2, S. 72—86.
[4] Beiträge zur Physiologie. Heft II, S. 81—131.
[5] Sitzungsber. d. Bayrischen Akad. der Wissensch. Math. Phys. Klasse. 10. Dec. 1864.

1856. D. Brewster *on Mr.* Roger's *theory of binocular vision. Proc. of Edinb. Soc.* III, 356—358.
1857. Giraud Teulon. *Note sur le mécanisme de la production du relief dans la vision binoculaire. C. R.* XLV, 566—569; *Inst.* 1857. 345—346. *Cosmos* XI, 459—461; 490—492; 495—495.
— D. Brewster. *The stereoscope.* London.
1858. E. Claparede. *Quelques mots sur la vision binoculaire et sur la question de l'Horoptre. Arch. d. sc. phys.* (2) III, 138—168. III, 225—267; III, 362—368.
— P. L. Panum. Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel.
1859. A. P. Prévost. *Note sur la vision binoculaire Arch. d. sc. phys.* (2) IV, 105—111.
— E. Claparède. *Remarques sur la note précédente.* Ebenda p. 112.
— J. v. Hasner. Ueber das Binocularsehen. Prager Ber. 1829, p. 10. Abhandl. der Kgl. Böhmischen Ges. (5) X, 25—34.
— A. W. Volkmann. Das Tachistoskop, ein Instrument, welches bei Untersuchung des momentanen Sehens den Gebrauch des elektrischen Funkens ersetzt. Leipz. Ber. 1859. p. 90—98.
— Derselbe. Die stereoskopischen Erscheinungen in ihrer Beziehung zu der Lehre von den identischen Netzhautstellen. Archiv für Ophthalm. V, 2, p. 1—100.
— A. Graefe. Beitrag zu der Lehre über den Einfluss der Erregung nicht identischer Netzhautpunkte auf die Stellung der Sehaxen. Arch. für Ophthalmol. V, 1, 128—132.
— F. v. Recklinghausen. Netzhautfunctionen. Archiv für Ophthalm. V, 2, p. 127—179; Pogg. Ann. CX, 65—92.
1860. F. August. Ueber eine neue Art stereoskopischer Erscheinungen. Pogg. Ann. CX, 582—593. *Phil. Mag.* (4) XX, 329—336. *Ann. de chim.* (3) LX, 506—509.
— W. Rogers. *Some experiments and inferences in regard to binocular vision. Edinb. J.* (2) XII, 285—287. *Silliman J.* (2) XXX, 387—390; 404—409. *Rep. of Brit. Assoc.* 1860. 2, p. 17—18.
— H. W. Dove. Ueber Stereoskopie (gegen v. Recklinghausen's Zweifel betreffs der elektrischen Beleuchtung stereoskopischer Bilder). Pogg. Ann. CX, 494—498.
— Giraud Teulon. *De l'unité de jugement ou de sensation dans l'acte de la vision binoculaire. C. R.* LI, 17—20. *Cosmos.* XVII, 24—27. *Inst.* 1860. p. 217.
— T. Hayden. *Sulla funzione della macchia gialla del Sömmering nel produrre l'unità della percezione visuale nella visione bioculare.* Cimento XI, 255—257.
1861. A. Nagel. Das Sehen mit zwei Augen und die Lehre von den identischen Netzhautstellen. Leipzig und Heidelberg. 1861. p. 1—184. Verhandl. d. naturh. Vereins d. Rheinl. XVII. Sitzungsber. p. 9—12.
— F. v. Recklinghausen. Zum körperlichen Sehen. Pogg. Ann. CXIV, 170—173. (Die Wirkung instantaner Beleuchtung betreffend.)
— W. Wundt. Ueber das Sehen mit zwei Augen. Henle u. Pfeuffer. (3) XII, 145—262.
— P. L. Panum. Ueber die einheitliche Verschmelzung verschiedenartiger Netzhauteindrücke beim Sehen mit zwei Augen. Reichert. Arch. für Anat. u. Physiol. 1861. p. 63—114; 178—227.
— F. Burckhardt. Die Empfindlichkeit des Augenpaars für Doppelbilder. Pogg. Ann. CXII, 596—606. Verhdl. der naturh. Ges. in Basel. III, 33—44.
— O. N. Rood. *On the relation between our perception of distance and colour. Silliman J.* XXXII, 184—185.
1862. Bahr. Ueber die Nichtexistenz identischer Netzhautstellen. Arch. für Ophthalm. VIII, 2, p. 179—184.
— A. Nagel. Ueber die ungleiche Entfernung von Doppelbildern, welche in verschiedener Höhe gesehen werden. Archiv für Ophthalmol. VIII, 2, 368—387.
— E. Hering. Beiträge zur Physiologie. 2. bis 5. Heft. Leipzig 1862—1864.
1863. L. Hermann. Notiz über die Gestalt der Horopterfläche bei convergenten Secundärstellungen. Centralbl. für medicinische Wissenschaften. 1863. Nr. 51.
— J. Towne. *The stereoscope and stereoscopic results.* Gay's *hospital rep.* 1862 bis 1865.
— F. C. Donders. Die Refractionsanomalien des Auges und ihre Folgen. Archiv für die holländischen Beiträge. III, p. 358. Pogg. Ann. CXX, p. 452.
— A. W. Volkmann. Ueber identische Netzhautstellen. Berliner Monatsber. 1863. August. (Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane.)
— H. Helmholtz. Ueber die normalen Bewegungen des menschlichen Auges. Archiv für Ophthalm. IX, 2, p. 188—190. (Dieselbe Abweichung beschrieben.)

1863. E. HERING über W. WUNDT's Theorie des binocularen Sehens. Pogg. Ann. CXIX, 115; CXXII, 476.
— W. WUNDT über Dr. E. HERING's Kritik meiner Theorie des Binocularsehens. Ebenda CXX, 172.
— A. W. VOLKMANN. Vorläufige Mittheilung über den Horopter und die Axendrehung des Auges. Centralblatt für die medicinischen Wissenschaften. 1863. Nr. 51.
1864. E. HERING. Das Gesetz der identischen Sehrichtungen. REICHERT und DU BOIS REYMOND Archiv. 1864. S. 27.
— Derselbe. Bemerkungen zu VOLKMANN's neuen Untersuchungen über das Binocularsehen. Ebenda S. 303.
— W. v. BEZOLD. Zur Lehre vom binocularen Sehen. Sitzungsber. der Königl. Bayrischen Akad. Math. Phys. Kl. 10. Dec. 1864.
— H. HELMHOLTZ. Ueber den Horopter. Archiv für Ophthalmologie. X, 1—60.
— Derselbe. Bemerkungen über die Form des Horopters. Pogg. Ann. CXXIII, 158—161.
1865. D. BREWSTER *on Hemiopia* in *Phil. Mag.* (4) XXIX, 506—507.
1858. H. AUBERT. Physiologie der Netzhaut. 280—331.
— E. HERING in REICHERT und DU BOIS REYMOND Archiv. 1865.
— A. GRAEFE. Ueber einige Verhältnisse des Binocularsehens, bei Schielenden mit Beziehung auf die Lehre von der Identität der Netzhäute. Archiv für Ophthalmol. XI, 2, 1—46.

§. 32. Wettstreit der Sehfelder.

In den beiden vorausgehenden Paragraphen haben wir gesehen, dass wir beim unbefangenen zweiäugigen Sehen Bilder körperlicher Objecte in den Raum vor uns projiciren, dass wir aber auch andererseits, wenn wir auf das gemeinschaftliche Gesichtsfeld unserer Augen als solches achten, die beiden verschiedenen perspectivischen Projectionen, welche von den Objecten auf unsern Netzhäuten entworfen werden, als einander superponirt in der Fläche des gemeinsamen Gesichtsfeldes erblicken können. Die erste Art des Sehens tritt vorzugsweise ein beim Sehen körperlicher Objecte, wenn unsere Aufmerksamkeit den Gegenständen zugewendet ist. Wir wenden dann immer die Gesichtslinien beider Augen demjenigen Objecte zu, auf welches sich unsere Aufmerksamkeit zur Zeit richtet, und wir sehen dieses also immer einfach und deutlich, und die ferner oder näher liegenden Gegenstände, welche zur Zeit im mehr oder weniger indirecten Sehen doppelt erscheinen könnten, bleiben unbeachtet. Um Doppelbilder zu sehen, müssen wir auf unsere Gesichtseindrücke als solche achten und zu abstrahiren suchen von den wahrgenommenen Objecten. Am ungestörtesten werden die Doppelbilder und die entsprechenden Erscheinungen der Congruenz oder Incongruenz der einzelnen Punkte beider Sehfelder beobachtet, wenn man nicht nach wirklichen Objecten hinsieht, sondern nach zwei verschiedenen Zeichnungen mit verschiedenartig gefärbten oder erleuchteten Linien und Feldern, wie dergleichen von uns gebraucht wurden, um die correspondirenden Stellen der Gesichtsfelder zu finden.

In den bisherigen Fällen waren die Doppelbilder, welche gesehen wurden, mehr oder weniger ähnlich den Bildern, welche man gelegentlich von einem und demselben äusseren Objecte erhalten kann, und uns deshalb geläufig und bekannt als Zeichen eines nicht im Horopter liegenden Objectes, so dass wir mittels derselben sogar die Entfernung des ihnen entsprechenden Objects noch annähernd richtig beurtheilen konnten.

Wir haben nun noch die Fälle zu untersuchen, wo beide Gesichtsfelder gefüllt sind mit ganz verschiedenartigen Formen, welche keine Combination zu dem Bilde eines Körpers zulassen. In solchen Fällen sieht man im Allgemeinen beide Bilder gleichzeitig und im Gesichtsfelde einander superponirt. Aber gewöhnlich herrscht in einzelnen Theilen des Gesichtsfeldes mehr das eine Bild vor, in anderen mehr das andere; und unter Umständen wechselt das auch, so dass, wo eine Zeit lang nur Theile des einen Bildes sichtbar waren, nun die Theile des anderen hervortreten und jene ersteren verdrängen. Dieser Wechsel, in welchem die Theile beider Bilder bald neben einander, bald nach einander sich gegenseitig verdrängen, pflegt man den **Wettstreit der Sehfelder** zu nennen.

Am einfachsten und regelmässigsten sind diejenigen Fälle, wo das eine Sehfeld in ganzer Ausdehnung gleichmässig gefärbt oder erleuchet ist; man bemerkt dann nur die Objecte, welche das andere Sehfeld enthält. Wenn man also zum Beispiel ein Auge schliesst und mit dem anderen das bedruckte Blatt ansieht, so sieht man die Buchstaben und das weisse Papier im Sehfelde, ohne das Dunkel des anderen Sehfeldes zu bemerken. Dabei ist zu beachten, dass das Papier dabei nicht gerade entschieden dunkler aussieht, als wenn man es mit beiden Augen betrachtet. Das Schwarz des einen Feldes mischt sich also nicht mit dem Weiss des anderen, sondern hat eben weiter gar keinen Einfluss auf die Erscheinung des anderen Bildes.

Ebenso ist es nun, wenn man das bisher verschlossene Auge öffnet und ein Blatt weissen Papiers nahe davorhält, so dass das bisher dunkle Sehfeld gleichmässig weiss beleuchtet wird. Auch dann sieht man die Buchstaben im anderen Felde unverändert, und wenn das gleichmässig weisse Papier nicht heller ist als das bedruckte, so erscheint letzteres auch nicht heller, wenn das andere Sehfeld gleichmässig weiss, als wenn es gleichmässig schwarz ist. Wenn man sich aber so wendet, dass das weisse vor das eine Auge gehaltene Papier lebhaft von der Sonne beschienen wird, so erhält man allerdings beim Oeffnen des betreffenden Auges den Eindruck, dass das bedruckte Papier heller wird, wenn das andere Sehfeld erleuchtet wird, als wenn es dunkel bleibt.

Aehnlich verhält es sich nun auch, wenn nur grössere Theile des einen Sehfeldes gleichmässig beleuchtet, in dem entsprechenden Theile des anderen aber Figuren enthalten sind. Betrachtet man zum Beispiel die folgenden Buchstaben

A B   B C

so, dass die beiden *B* auf einander fallen und einfach gesehen werden, so erscheinen sie wie

A B C

und zwar so, dass das *A* und *C* nicht merklich dunkler sind, als das doppeläugig gesehene *B*. In diesem Falle also ist links vom *B* nur das linke Ge-

sichtsfeld beachtet worden, welches das A enthält, und rechts vom B tritt das C des rechten Sehfeldes hervor, während der gleichmässig weisse Grund des anderen Feldes sich nicht merklich geltend macht.

Wenn nun in beiden Sehfeldern breitere schwarz und weisse Figuren vorkommen, deren Grenzlinien in dem gemeinsamen Sehfelde sich gegenseitig durchschneiden, so ergiebt sich im Allgemeinen die Regel, dass längs und in der Nähe jeder Grenzlinie dasjenige Sehfeld prädominirt, dem diese Grenzlinie angehört. Bringt man also zum Beispiel die beiden schwarzen Streifen der *Fig. V, Taf. XI*, zum Decken, so dass die weissen Punkte in ihrer Mitte zusammenfallen, so entsteht ein Gesammtbild, wie es *Fig. 210* etwa darstellt. Die beiden

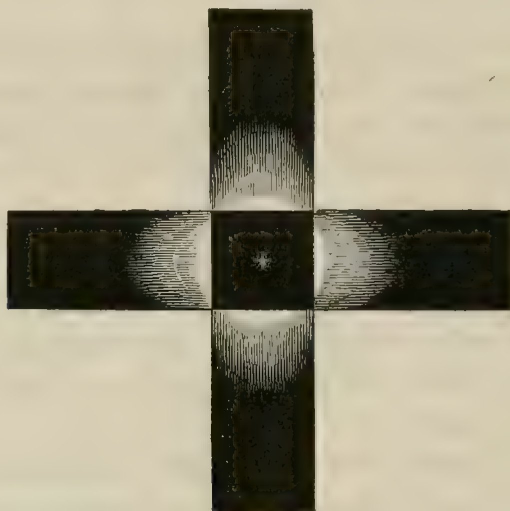


Fig. 210.

Streifen erscheinen als Kreuz, dessen Mitte ganz schwarz ist, weil hier Schwarz und Schwarz sich decken. Der Grund erscheint weiss, weil auf ihm Weiss und Weiss sich decken. In den vier Schenkeln des Kreuzes deckt sich jedesmal Weiss des einen Feldes mit Schwarz des anderen; sie erscheinen aber keineswegs gleichmässig erhellt durch eine Mischung dieses Schwarz und Weiss. Vielmehr sind sie fast ganz schwarz an ihren Enden, wo sie an den weissen Grund stossen, und fast ganz weiss, wo sie an das mittlere schwarze Quadrat stossen, und dazwischen sind Uebergänge des Schwarz in Weiss, die aber keineswegs eine ruhige Beleuchtungsart behalten und sich deshalb auch durch keinerlei bildliche Dartellung vollkommen wiedergeben lassen, sondern mannichfach wechseln. Das Ende jedes Streifens fällt zusammen mit einem Theil des gleichmässig weissen Grundes des andern Gesichtsfeldes, und verdrängt diesen, so dass es fast ganz ganz schwarz erscheint. Nahe der Mitte jedes Streifens aber laufen über ihn die Grenzlinien des anderen aus dem anderen Sehfelde hin, und hier tritt also das Weiss des anderen Feldes längs der Grenzlinie auf dem Schwarz des erstgenannten Streifens deutlich hervor.

In den bisher betrachteten Fällen standen sich immer gegenüber eine Figur mit bestimmten Contouren und ein ganz leeres gleichmässiges Feld. Dabei zeigte sich, dass die Contouren sich immer sichtbar machen und den Eindruck des leeren Feldes verdrängen. Setzen wir nun statt des ganz leeren Feldes ein solches, welches ein feines gleichmässig wiederholtes Linienmuster enthält, rich-

ten wir zum Beispiel das linke Auge auf das schwarze Kreuz der *Fig. W*, *Taf. XI*, und gleichzeitig das rechte auf das carrirte Feld, so überwiegt im ersten Augenblick auch hier in der Regel das Kreuz so, als ob wir es auf einen reinen Grund projicirten, und nur in seiner Mitte und jenseit seines Umfanges wird vielleicht das Linienmuster sichtbar. Betrachten wir es ohne bestimmte Richtung unserer Aufmerksamkeit längere Zeit in dieser Weise, so tritt zeitweilig das Linienmuster auch wohl über das ganze Feld hervor und verdeckt das ganze Kreuz oder wenigtens einzelne Theile desselben. Dagegen muss ich hervorheben, dass ich mich jeden Augenblick im Stande finde, meine Aufmerksamkeit jedem Theile des Linienmusters, auch denen, die gerade auf den Rand des Kreuzes fallen, willkührlich und ausschliesslich zuzuwenden, und dass ich dann nur das Linienmuster sehe, während das Kreuz meist ganz schwindet. Ich brauche nur eine Reihe von Quadraten des Linienmusters zu zählen, oder die Quadrate zu vergleichen, ob sie gleich gross, ob sie rechtwinkelig sind und so weiter. Während und so lange ich in dieser Weise meine Aufmerksamkeit fest auf die Quadrate fixire, bleiben sie mir auch im Gesicht. So wie ich im Gegentheil eine Ecke oder Seite des Kreuzes in ähnlicher Weise beobachte, verschwindet das Linienmuster mehr oder weniger vollständig, und ich sehe anhaltend das Kreuz.

Der Wettstreit wird noch auffallender, wenn die beiden sich deckenden Figuren gleich stark hervortretende Contoure haben. Bringt man zum Beispiel die beiden Linienpaare der *Fig. 211* zum Decken, so pflegen die meisten Beob-

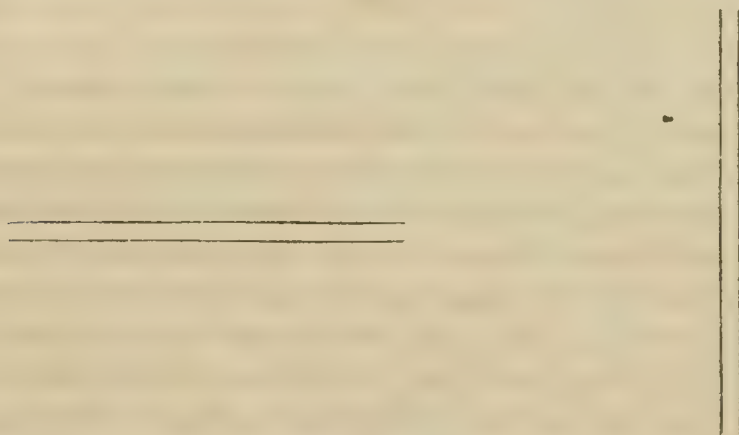


Fig. 211.

achter im Anfang nur die senkrechten Linien an der Kreuzungsstelle zu sehen, während die horizontalen im Zwischenraum der Verticallinien oder auch selbst noch ausserhalb dieses Zwischenraums verschwinden. Bei längerem Fixiren tauchen sie von Zeit zu Zeit auf, während dafür die verticalen verschwinden und umgekehrt. Aber auch hier kann ich beliebig das Bild des einen oder anderen Paares festhalten, wenn ich meine Aufmerksamkeit darauf richte und etwa untersuche, ob irgend welche Unregelmässigkeiten an den Linien des einen oder anderen Paares vorkommen.

In complicirterer Weise zeigt sich derselbe Wettstreit an den mit verschieden gerichteten parallelen Linien bedeckten Feldern der *Fig. X*, *Taf. XI*. Man sieht

hier keine gleichmässige Kreuzung der Linien in dem Gesammtbilde, wodurch ein ähnliches Linienmuster, wie das der *Fig. W* derselben Tafel, sich zusammensetzen würde; sondern man sieht meist eine ungleichmässige Mischung beider Muster, so dass an einzelnen Stellen des Feldes das eine, an anderen das andere vorherrscht, wobei diese Stellen selbst übrigens einem fortdauernden Wechsel unterworfen sind. Die schwarzen Quadrate in der Mitte der Felder sollen als Fixationszeichen dienen, wenn der Beobachter eine unveränderte Lage beider Felder über einander zu erhalten wünscht. Ohne einzelne correspondirende und stark hervorstechende Theile der Figur ist dies sonst gar nicht möglich, vielmehr schwanken die Blicklinien dann fortdauernd zwischen verschiedenen Graden der Convergenz hin und her.

Zuweilen tritt auch wohl in ganzer Ausdehnung der Fläche das eine System allein für kurze Zeit auf. Auch hier finde ich, dass ich vollkommen willkührlich im Stande bin, meine Aufmerksamkeit bald dem einen, bald dem anderen Liniensysteme zuzuwenden, und dass dann dieses System für einige Zeit allein gesehen wird und das andere vollkommen verschwindet. Dies geschieht zum Beispiel, wenn ich versuche die Linien erst des einen und dann des anderen Systems zu zählen. Ich finde ferner, dass dieses Beachten des einen Liniensystems auch nicht von bestimmten Augenbewegungen abhängig ist; denn ich kann meinen Blick sowol an den Linien, auf die ich achte und die ich sehe, entlang gleiten lassen, als auch rechtwinkelig gegen ihre Richtung und also parallel der Richtung des anderen Systems fortführen, so dass ich von einer Linie zur anderen gehe, ohne dass ich aufhöre, nur das System zu sehen, welches ich sehen will. Aber allerdings finde ich, wie Wundt, dass es leichter ist, das Bild derjenigen Linien festzuhalten, deren Richtung man mit dem Blicke folgt; in der That ist dies auch die gewöhnliche Art unsere Aufmerksamkeit einer Linie zuzuwenden, dass wir den Blick an ihr entlang laufen lassen, und indem wir die Bewegung unserer Augen absichtlich nach der Linie richten, sind wir auch sicher, unsere Aufmerksamkeit an die Linie zu fesseln.

Es ist aber allerdings schwer, die Aufmerksamkeit längere Zeit an eines der Liniensysteme von *Fig. 214* zu fesseln, wenn man nicht damit irgend einen bestimmten Zweck verbindet, der eine fortdauernde active Thätigkeit der Aufmerksamkeit bedingt, wie eben das Zählen der Linien oder die Vergleichung ihrer Zwischenräume und so weiter ist. Ein anhaltender Ruhezustand der Aufmerksamkeit ist ja auch unter anderen Verhältnissen kaum für einige Zeit zu unterhalten. Der natürliche ungezwängte Zustand unserer Aufmerksamkeit ist herumzuschweifen zu immer neuen Dingen, und so wie das Interesse eines Objectes erschöpft ist, so wie wir nichts Neues mehr daran wahrzunehmen wissen, so geht sie wider unseren Willen auf anderes über. Wollen wir sie an ein Object fesseln, so müssen wir eben an diesem selbst immer Neues zu finden suchen, besonders wenn andere kräftige Sinneseindrücke sie abzulenken streben. Durch diese Eigenthümlichkeit unserer psychischen Thätigkeit erklären sich, wie mir scheint, die oben beschriebenen Thatsachen.

Die letztgenannten Versuche kann man vielfach variiren; wenn man zum Beispiel das quadratische Muster der *Fig. W, Taf. XI*, mit einem danebengelegten Blatte

bedruckten Papiers zur Deckung bringt, kann man ohne Schwierigkeit die Buchstaben lesen oder andererseits das Linienmuster betrachten. Dasselbe ist der Fall, wenn man eine fein ausgeführte Landkarte oder eine Photographie mit einem bedruckten Blatte zum Decken bringt; es müssen nur nicht die Zeichnungen der einen Seite durch Helligkeit allzu hervorstechend sein gegen die der anderen Seite, und auch einander nicht zu ähnlich. Wenn man zum Beispiel zwei verschiedene Druckblätter mit gleicher Art von Druck combinirt, so verbindet der Beobachter unwillkührlich Theile der einen Parthie von Buchstaben mit solchen der anderen Seite doppeläugig, und dadurch mischen sich dann die Buchstaben beider Seiten leicht durch einander.

Ich will namentlich hier auch noch hervorheben, dass es mir gelingt, ganz schwache und zart gezeichnete Objecte des einen Sehfeldes zu sehen und dauernd zu beobachten, selbst wenn sie sich mit sehr kräftig gezeichneten Contouren des anderen Feldes decken. So kann ich die Faserung und die kleinen Fleckchen eines weissen Papierblattes verfolgen, während im anderen Felde stark gezeichnete schwarze Figuren stehen. Oder ich kann eine mit einem dünnen weissen Blatte zugedeckte und kaum erkennbare Druckschrift lesen, welche sich binocular etwa mit dem Gitter oder dem Kreuze der *Fig. W*, *Taf. XI*, deckt. Oder ich kann mittels eines Spiegels, den ich vor das eine Auge halte, das helle Bild des Fensters zur binocularen Deckung mit einer verhältnissmässig schwach erleuchteten Druckschrift bringen und diese lesen, ohne dass sie mir jemals durch das viel hellere Bild des Fensters verdrängt wird. Natürlich kann ich ebenso gut das Spiegelbild des Fensters betrachten, wobei mir die Druckschrift verschwindet. Dass man bei einem solchen Versuche sehr schwach beleuchtete Objecte des einen Feldes nicht immer erkennen kann, wenn das andere Auge auf ein sehr helles Feld gerichtet ist, findet seine Erklärung dadurch, dass die Pupillen beider Augen unter dem Einflusse des hellen Lichts sich verengern und das Netzhautbild des dunkleren Feldes also wirklich noch sehr viel dunkler wird, als es ist, wenn das helle Bild verdeckt wird.

Aus den beschriebenen Erfahrungen geht hervor, dass der Mensch die Fähigkeit hat die Bilder jedes einzelnen Sehfeldes einzeln und für sich wahrzunehmen, ungestört von dem anderen Sehfelde, wenn es nur mittels eines der angegebenen Hilfsmittel gelingt, die Aufmerksamkeit ganz auf die Objecte dieses einen Feldes zu fesseln. Diese Thatsache ist wichtig, weil aus ihr hervorgeht, dass der Inhalt jedes einzelnen Sehfeldes, ohne durch organische Einrichtungen mit dem des anderen verschmolzen zu sein, zum Bewusstsein gelangt, und dass die Verschmelzung beider Sehfelder in ein gemeinsames Bild, wo sie vorkommt, also ein psychischer Act ist.

Um den Unterschied recht hervorzuheben, brauchen wir nur zu vergleichen die binoculare Verschmelzung der beiden schrägen und verschieden gerichteten Liniensysteme der *Fig. X*, *Taf. XI*, mit der monocularen Vereinigung beider in dem Liniensysteme der *Fig. W*. Wir können auch in dem letzteren die Linien des einen Systems zählen oder ihre Abstände vergleichen, dabei werden aber niemals die Linien des anderen Systems aus dem Bilde verschwinden, wie

dies bei der binocularen Vereinigung unter diesen Bedingungen der Regel nach geschieht. Bei monocularer Betrachtung des combinirten Liniensytems der *Fig. W* haben wir nur einen sinnlichen Eindruck, den wir durch keine Anstrengung der Aufmerksamkeit verändern können, wenn wir auch diese oder jene Züge desselben vorzugsweise beachten. Verschmölzen die beiden entsprechenden Bilder der *Fig. X* wirklich zu einem einzigen und einfachen sinnlichen Eindrucke, so würde dieser durch Anstrengung der Aufmerksamkeit allein in keiner Weise in seine Bestandtheile zu zerlegen sein. Charakteristisch ist es auch, dass wenn man mittels einer unbelegten Glasplatte im monocularen Gesichtsfelde das Bild des hellen Himmels mit einem bedruckten Blatte zum Decken bringt, man bei gewissen Beleuchtungsgraden die Buchstaben nicht lesen kann, während man sie sehr wohl lesen kann, wenn man binocular den sehr viel stärkeren Reflex einer belegten Spiegelplatte mit ihnen zur Deckung bringt.

Der Wettstreit der Sehfelder, wie er sich bei binocularer Verschmelzung der obigen Bilder entwickelt, entspricht dem hin und herschwankenden Zustande der nicht angestrengten und nicht interessirten Aufmerksamkeit, die von einem Eindruck zum anderen zu wandern pflegt und so allmählich eine Uebersicht der vorliegenden Objecte gewinnt. Dass dieser Wechsel nicht auf einer organischen Einrichtung des Nervensystems beruht, wie Panum und E. Hering es auffassen, wenigstens auf keiner anderen, als die unseren Seelenthätigkeiten zu Grunde liegt, scheint mir evident aus der Thatsache der Selbstbeobachtung hervorzugehen, dass wir durch die bekannten und oben genannten rein psychischen Mittel, die Aufmerksamkeit zu fesseln, das Schwanken sogleich anhalten können, ohne dass dabei irgend eine bemerkbare Aenderung der äusseren Umstände, der Richtung oder Bewegung der Augen und so weiter, stattfindet. Panum hat darin Recht, dass es nicht genügt die Aufmerksamkeit auf das verschwindende oder verschwundene Bild richten zu wollen, wobei er die Aufmerksamkeit für eine dem bewussten Willen des Beobachters absolut unterthänige Thätigkeit erklärt. Das letztere ist nun doch nur in gewisser Beschränkung richtig. Wir bewegen unsere Augen auch willkührlich, aber ein Ungeübter kann die Absicht, sie convergiren zu lassen, nicht so unmittelbar ausführen. Wohl aber kann er in jedem Moment die Absicht ausführen ein nahes Object anzublicken, wobei die Augen convergiren. Ebenso wenig können wir die Absicht unsere Aufmerksamkeit an einem bestimmten Objecte festzuhalten, wenn wir uns diese Absicht in dieser Form innerlich aussprechen, erreichen, sobald das Interesse an dem Objecte erschöpft ist; aber wir können uns neue Fragen in Bezug auf das Object stellen, so dass ein neues Interesse daran entsteht, und dann wird die Aufmerksamkeit gefesselt bleiben. Das Verhältniss ist also, wie bei dem oben genannten Beispiele; es ist keine unmittelbare, sondern eine mittelbare Willkühr. Wir können durch unsern Willen Acte ausführen, bei denen das Auge oder die Aufmerksamkeit die Richtung erhält, die wir wünschen, obgleich wir nicht durch einen direct darauf gerichteten Willensact ohne Zwischenglieder die Richtung des Auges oder der Aufmerksamkeit bestimmen können. Dagegen trifft allerdings, wie ich wiederum gegen Panum behaupten muss, die andere charakteristische Eigenschaft der Aufmerksamkeit auch für den Wettstreit der

Sehfelder zu, dass sie durch geeignete Methoden an die allerschwächsten Sinneseindrücke gefesselt werden kann, während die allerstärksten im anderen Sehfelde sie abzulenken streben. Natürlich ist dabei desto grössere Anstrengung nöthig, je ungünstiger das Verhältniss der Stärke für die beachteten Eindrücke ist.

Da wir nun übrigens, wie die oben beschriebenen Versuche mit momentaner Beleuchtung deutlich zeigen, im Stande sind gleichzeitig eine gewisse Anzahl von Gegenständen zu beachten und dadurch einen gewissen Theil des Sehfeldes auszufüllen, so wird auch hierbei im Allgemeinen zu erwarten sein, dass sich zunächst das Gesichtsfeld füllt mit denjenigen Objecten, die den stärkeren Eindruck machen, oder dass bei gleich starken Reizen in beiden Sehfeldern ein Schwanken eintritt, oder ein Suchen nach einem zusammenhängenden und verständlichen Eindrucke, wobei denn nicht nothwendig immer im ganzen Gesichtsfelde nur der Eindruck des einen Auges vorzuherrschen braucht. Charakteristisch für dieses Suchen nach einem verständlichen Eindrucke ist auch das fortdauernde Schwanken der Blicklinien. Es ist kaum möglich, die beiden Bilder in gleicher Lage dauernd in Deckung zu halten.

Etwas Anderes ist es, wenn sich die beiden verschiedenen Bilder als sinnliches Zeichen eines äusseren Objects betrachten lassen, dann wendet sich die Aufmerksamkeit sogleich der Wahrnehmung von diesem zu, ohne der Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder zugelenkt zu werden.

Was nun den merkwürdigen Einfluss der Contoure in dem Wettstreit der Sehfelder betrifft, so bin ich ebenfalls der Meinung, dass derselbe im Wesentlichen auf psychischer Gewöhnung beruht. Erwägen wir nämlich, in welcher Weise unser Auge das Gesichtsfeld zu durchmustern hat, um eine vollständige Kenntniss desselben zu erhalten, so ist klar, dass es ganz unnütze Mühe sein würde, dasselbe nach einander auf alle einzelnen Punkte einer ausgedehnten gleichmässig beleuchteten Fläche richten zu wollen; wir würden dadurch nichts weiter erkennen. Es genügt vielmehr den Blick über die Grenze der Fläche hinzuführen und auf alle diejenigen einzelnen Punkte zu richten, die sich von der Fläche abheben. Sobald dies geschehen ist, haben wir eine so genaue Kenntniss von der Fläche, als das Auge uns geben kann. Es sind deshalb namentlich die im indirecten Sehen sichtbaren Contoure, denen wir bei der Durchmusterung des Gesichtsfeldes erst unsere Aufmerksamkeit und dann unsern Blick zuzuwenden haben. Es ist bekannt, wie schwer es ist, einen kleinen Gegenstand der im indirecten Sehen nicht bemerkt wird, auf einer ausgedehnten hellen Fläche aufzufinden; bezeichnend nennt zum Beispiele Goethe die Lerche „im blauen Raum verloren“. Andererseits zieht ein etwas grösserer und auch für das indirecte Sehen hinreichend scharf gezeichneter Gegenstand unmittelbar unseren Blick auf sich, und wenn man sich selbst bei der Betrachtung eines noch unbekannten Objects beachtet, wird man leicht bemerken, wie man mit dem Blicke den Contouren folgt. Gewöhnung und Uebung müssen also nothwendig dahin wirken, unsere Aufmerksamkeit den Contouren zuzuwenden. Auch bei den Contrasterscheinungen habe ich darauf aufmerksam gemacht, wie die Contoure namentlich in das Gewicht fallen.

Man könnte auch daran denken, dass die Erregung der Netzhauttheile längs einer Grenze von Weiss und Schwarz lebhafter sei, so oft durch die Bewegungen des Auges Elemente der Netzhaut aus dem Schwarz in das Weiss rücken. Diese ausgeruhten Elemente würden allerdings stärker erregt werden, als die schon länger von Weiss getroffenen. Indessen glaube ich nicht, dass dieser Umstand hier wesentlich in Betracht kommt, weil wir bei den oben beschriebenen Versuchen die Richtung der Augenbewegungen ohne entscheidenden Einfluss gefunden haben, und weil die Contoure in den Doppelbildern sich auch gleich beim ersten Aufschlag der Augen geltend machen, wo noch keine Nachbilder entwickelt sein können.

Panum's Annahme dagegen, dass die Contoure an und für sich die Netzhaut stärker erregen, scheint mir durch keine einzige sichere Thatsache unterstützt und zur Erklärung der hier vorliegenden Erscheinungen gänzlich unnöthig zu sein. Bei den Contrasterscheinungen haben wir allerdings gesehen, dass der Unterschied der Beleuchtung oder Färbung zweier Felder längs einer Contour, wo beide zusammenstossen, stärker hervortritt als wenn beide von einander getrennt sind, und sogar relativ zu gross erscheint. Wenn wir aber von den Nachbildern absehen, so lassen sich die Erscheinungen des simultanen Contrastes darauf zurückführen, dass wir besser geübt und sicherer sind in der Vergleichung der Beleuchtung zweier neben einander liegenden Netzhautpunkte, welche bei den Bewegungen des Auges viel häufiger unmittelbar hinter einander von derselben Beleuchtung getroffen werden, als dies bei entfernteren der Fall ist. Dass uns ein solcher Unterschied relativ zu gross erscheint und dadurch dann Irrthümer in der Beurtheilung der Färbungen entstehen, entspricht der allgemeinen Regel, dass wir überhaupt deutlich wahrnehmbare Unterschiede für grösser zu halten geneigt sind, als undeutlich wahrnehmbare. Man könnte einen solchen deutlicher wahrnehmbaren Unterschied vielleicht als einen stärkeren psychischen Reiz bezeichnen, und es mag zum Theil darin begründet sein, dass er die Aufmerksamkeit stärker zu fesseln strebt. Einen stärkeren Nervenreiz dabei anzunehmen, vorausgesetzt, dass Nachbilder vermieden werden, sehe ich keinen Grund.

Aehnliche Erscheinungen des Wettstreits treten nun auch ein, wenn beiden Augen verschiedenfarbige oder verschieden erleuchtete Felder dargeboten werden. Wenn man durch zwei verschiedenfarbige Gläser von lebhaften Farben, zum Beispiel mit dem rechten Auge durch ein rothes, mit dem linken durch ein blaues Glas, welche ungefähr gleiche Helligkeit haben, nach den äusseren Objecten sieht, so erblickt man diese fleckig roth und blau und zwar so, dass die Farben oft wechseln. Der unruhige sonderbare Farbenwechsel ist anfangs meist am lebhaftesten, bald stumpft sich die Empfindlichkeit für die Farben ab und das Aussehen wird dann ein ruhigeres in einer unbestimmten mehr grauen Farbe, welche noch stellenweise und zeitweise zwischen einem röthlicheren oder blaueren Tone wechselt, und welche manche Beobachter für die Mischfarbe aus den beiden vereinigten, also in diesem Falle für Rosa erklären. Ich selbst muss sagen, dass ich trotz vieler und mannichfach veränderter Versuche in keinem Falle die Mischfarbe mit einiger Evidenz habe sehen können. Zum

Theil bestimmen auch die Eigenthümlichkeiten der Objecte, ob man mehr die eine oder die andere Farbe sieht. Hellere Objecte erscheinen überwiegend roth, dunklere blau, wohl deshalb, weil überhaupt bei grösserer Lichtstärke Roth, bei schwächerer Blau in der Empfindung überwiegt. Objectiv rothe Objecte erscheinen natürlich auch roth, blaue blau, weil ein jedes durch das gleichnamige Glas gesehen heller erscheint, als durch das anders gefärbte. Auch hier spielt wieder die Aufmerksamkeit auf das eine oder andere Feld eine merkliche Rolle. Obgleich es sehr schwer ist, die Aufmerksamkeit gerade nur der Farbe des einen Feldes zuzuwenden, wenn sie dabei nicht unterstützt ist durch Contoure, die diesem Felde angehören, so gelingt es doch einzelnen Beobachtern (Funke [1], J. Dingle, Voelckers [2], Volkmann [3], E. A. Weber [4], Welcker [5], mir selbst), die Aufmerksamkeit auf das rechte Auge und was es sieht, und dann ebenso auf das linke zu fixiren, wobei denn auf den Objecten die Farbe des zugehörigen Glases zum Vorschein kommt. Fechner [6], dem der Wechsel durch willkührliche Anstrengung weniger gut gelang, glaubt diesen Wechsel von einer unwillkührlichen Bewegung oder Compression des Auges ableiten zu dürfen, welche nach seinen Beobachtungen nur überhaupt den Wechsel der Farbe begünstige, aber nicht gerade den Wechsel in der beabsichtigten Richtung. Sehr viel besser noch gelingt der Versuch, wenn man die Gläser so hält, dass Spiegelbilder schwach erleuchteter, seitwärts liegender Gegenstände von ihnen in das Auge geworfen werden. So wie man nun die Aufmerksamkeit einem dieser Spiegelbilder zuwendet, sei es ein noch so schwach sichtbares Schattenbild, so erscheint sogleich an der betreffenden Stelle des Sehfeldes die Farbe des betreffenden Glases. Und wenn in derselben Stelle des Gesichtsfeldes gleichzeitig ein Spiegelbild des andern Glases sichtbar ist und man wendet diesem die Aufmerksamkeit zu, so tritt auch die andere Farbe hervor.

Um diesen Versuch methodisch auszuführen, stellte ich eine blaue und rothe Glasplatte (*B* und *R* in *Fig. 212*) senkrecht auf einen Tisch; *C* ist ein dunkler Schirm, der an der nach *B* gekehrten Seite ein mit Buchstaben bedrucktes Blatt trägt, *D* ein eben solcher, an dessen innerer Seite irgend ein anderes mit den Buchstaben nicht leicht zu verwechselndes Muster, also etwa eine Zahlentabelle angebracht ist. Bei *A* befindet sich ein weisser Schirm, *O* und *O'* sind die Augen des Beobachters. Die Beleuchtung regelt man so, dass die Buchstaben und die Zahlen, welche der Beobachter in ihren von den Glasplatten entworfenen Spiegelbildern sieht, eben noch sicht-

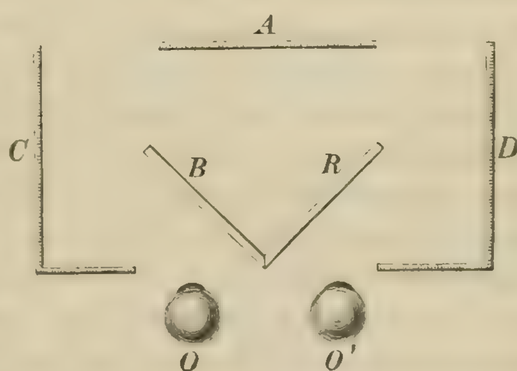


Fig. 212.

[1] Lehrbuch der Physiologie. 1. Aufl. Bd. II, 875.
[2] Müller's Archiv. 1838, p. 61 und 63.
[3] Neue Beiträge zur Physiol. des Gesichts. p. 97, 99.
[4] Programma Colleg. 118.
[5] Ueber Irradiation. 1852. p. 107.
[6] Abhandlungen der Sächsischen Ges. d. Wiss. VII. (1860.) 399—408.

bar sind, wenn der Bogen *A* stark beleuchtet ist. Scheinbar liegen für den Beobachter die Spiegelbilder der Buchstaben und Zahlen auf dem Bogen *A*. Ich sehe nun ganz regelmässig, wenn ich den Buchstaben mit dem Auge zu folgen suche, den Grund blau, wenn ich den Zahlen folge, dagegen roth. Also die auf das Bild der einen Netzhaut gerichtete Aufmerksamkeit bringt auch den zugehörigen farbigen Grund zum Vorschein. Hierbei ist noch zu bemerken, dass die Contoure, welche in diesem Falle den einen Eindruck überwiegen machen, Grenzen von Weiss und Schwarz sind, ohne dass die Intensität der sichtbar werdenden Grundfarbe an ihnen eine Veränderung erleidet. Oder wenn man die ganze gemischte Beleuchtung zusammennimmt, so erscheinen die Buchstaben links reinblau auf weisslichem Blau, die Zahlen rechts reinroth auf weisslichem Roth. Bei den Contrasterscheinungen würde die Aufmerksamkeit nur dem Gegensatz von Schwarz und Weiss, nicht dem Blau oder Roth zugelenkt werden, was bei den hier beschriebenen binocularen Versuchen gerade im Gegentheil geschieht.

Noch einfacher gelingt mir dieser Versuch sehr leicht und gut, wenn ich nach dem Himmel blicke und vor das eine Auge ein rothes, vor das andere ein blaues Glas nehme, beide aber so gegen die Gesichtslinien neige, wie in *Fig. 212*, dass ich in jedem der Gläser schwache Spuren der Spiegelbilder seitlich gelegener Objecte sehe, und nun bald das eine, bald das andere Glas ein wenig bewege, so dass sich auch die von ihnen entworfenen Spiegelbilder ein wenig bewegen. Achtet man auf diese bewegten Bilder, die übrigens ganz verwaschen und lichtschwach sein dürfen, so tritt sogleich am Himmel die Farbe des entsprechenden Glases heraus. Es ist ein wunderliches Schauspiel, wenn so plötzlich, wie auf Commando, der blaue Himmel ganz roth, oder der rothe ganz blau wird.

Ob bei der binocularen Deckung verschiedenfarbiger Felder die Mischfarbe gesehen werde, oder nicht, darüber sind verschiedene Beobachter direct entgegengesetzter Meinung. Während H. Meyer, Volkmann, Meissner, Funke, denen ich mich selbst auch anschliessen muss, niemals die Mischfarbe gesehen haben, erklären ebenso entschieden Dove, Regnault, Brücke, Ludwig, Panum, Hering, dass sie sie gesehen haben, und zwar nicht bloss bei matten und weisslichen Farben, sondern selbst bei gesättigten. Dove berichtet, dass er sie selbst an den allergesättigtesten Farben, denen des prismatischen Spectrum gesehen habe, indem er ein objectiv auf die Wand geworfenes Spectrum gleichzeitig mit einem umkehrenden und einem nicht umkehrenden Fernrohr binocular betrachtete. Ausserdem empfiehlt er als besonders geeignet Polarisationsfarben. Wenn man vor eine schwarze Glasplatte, die das Licht unter dem Polarisationswinkel reflectirt, dünne Glimmer oder Gypsblättchen in passender Lage anbringt, und vor das rechte Auge ein Nicol'sches Prisma in der Lage hält, wo es das von der Glasplatte reflectirte Licht im Maximum durchlässt, vor das linke Auge ein ebensolches Prisma, um einen rechten Winkel gedreht, so dass es das reflectirte Licht nicht durchgehen lässt, so sieht man mit beiden Augen die Krystallblättchen farbig, und zwar zeigen sie für beide Augen genaue Complementärfarben. Dove und Regnault haben nun in solchen Fällen diese

Complementärfarben sich binocular zu Weiss vereinigen gesehen. Ich habe diese Versuche wiederholt und mir sind sie regelmässig und vollständig misslungen. Ich sehe sowohl mit spectralen als mit Polarisationsfarben genau denselben Wettstreit und Wechsel der verschiedenen einfachen Farben, ohne dass die Mischfarbe zum Vorschein kommt, wie bei Pigmentfarben und den Farben gefärbter Gläser. Ich habe auch senkrecht zur Axe geschnittene Quarzplatten zu diesen Versuchen sehr vortheilhaft gefunden. Wenn man die Nicol'schen Prismen vor den Augen dreht, kommen neue Farben zum Vorschein. Ich sehe aber immer beide Farben getrennt, und gleichsam eine durch die andere, und kann immer augenblicklich angeben, ohne ein Auge zu schliessen, welche Farben da sind. Zur Vergleichung mit den Farben hat man dabei den hellweissen Grund der spiegelnden Platte, der die Mischfarbe zeigt, welche zum Vorschein kommen sollte, und eben deshalb ist es leicht, bei diesen Versuchen den grossen Unterschied zwischen der binocularen Vereinigung verschiedener Farben und ihrer wirklichen Vereinigung zu erkennen.

Obgleich ich einsehe, wie misslich es ist, so vielen ausgezeichneten und zuverlässigen Beobachtern in einer Sache zu widersprechen, in der vielleicht ausserordentlich grosse individuelle Unterschiede bestehen, so will ich hier doch einige Umstände anführen, welche bei meinen eigenen Versuchen zuweilen den Schein einer Mischfarbe hervorbrachten, während sich bei genauerer Untersuchung herausstellte, dass für mein Auge wenigstens eine solche nicht vorhanden war.

Zuerst ist folgendes zu bemerken: wenn man die binoculare Combination zweier Farben vor sich hat und ausserdem auch noch beide Componenten einzeln, wenn man also z. B. mit parallelen Augenaxen nach einem blauen Felde blickt, welches seitwärts an ein rothes anstösst, so dass ein Doppelbild der Grenzlinie erscheint und auf der einen Seite sich Blau mit Blau, auf der andern Roth mit Roth, in der Mitte aber Roth mit Blau deckt, so unterscheidet sich das mittlere Blau von dem reinen Blau an seiner Seite allerdings dadurch, dass zu ihm im Gesichtsfelde auch noch mehr oder weniger Roth hinzukommt, und Jemand, der die Mischungsregeln der Farben kennt und gewöhnt ist, aus Blau und Roth sich Violett oder Purpur zusammensetzen zu sehen, könnte dies mit Roth zusammengesetzte Blau nun wohl für Violett erklären. Auch kommt es ja selbst im monocularen Felde vor, dass wirklich bestehendes Violett vermittels des Contrastes gegen nebenstehendes Blau, oder weil das Blau einer über die Farben hingebreiteten Decke oder der Gesammtbeleuchtung des Feldes anzugehören scheint, vom Beobachter in Blau und Roth aufgelöst wird. Wir haben Beispiele der Art im 24. Paragraphen besprochen. Es kann also wirklich monocular zu Violett vereinigtes Roth und Blau unter Umständen so getrennt erscheinen, wie das binocular sich deckende für meine Augen immer erscheint, und dadurch kann ein solcher Beobachter vielleicht verleitet werden zu glauben, dass wo er Blau und Roth gleichzeitig sieht, dass da Violett oder Purpur sei. Wenn man nun aber die wirkliche Mischfarbe der beiden gesehenen Farben zur Erscheinung bringt, so tritt der Unterschied schlagend hervor. Die beste und genaueste Methode die Mischfarbe hervorzubringen, ist folgende.

Man legt zwei blaue und zwei rothe quadratische Felder wie die eines Schachbretts zusammen, so dass z. B. das rechte obere und linke untere blau, das linke obere und rechte untere roth sind. Dann bringt man vor jedes Auge ein doppeltbrechendes achromatisirtes Kalkspathprisma in derjenigen Stellung, dass es über einander liegende Doppelbilder giebt. Indem die Doppelbilder der farbigen Felder sich theilweis über einander schieben, entsteht für jedes Auge längs der horizontalen Trennungslinie der farbigen Felder ein aus Roth und Blau monocular gemischter, also rosarother Streifen. Jetzt blickt man mit parallelen Gesichtslinien nach den Feldern hin, so dass ihre Bilder sich binocular über einander schieben. Dann hat man oben rechtes Blau und linkes Roth sich deckend, in der Mitte Rosaroth mit Rosaroth, unten rechtes Roth mit linkem Blau. Unter diesen Umständen ist es für meine Augen ganz deutlich, dass in der binocularen Combination von Blau und Roth keine Spur von dem Rosenroth, wie es der mittlere Streifen zeigt, enthalten ist, sondern nur die beiden einzelnen Farben getrennt.

Panum legt Gewicht darauf, dass die binocular zu mischenden Farben nicht zu lebhaft und nicht zu verschieden sein dürfen, weil sonst der Wettstreit der Sehfelder zu lebhaft und unruhig sei, und man dadurch verhindert werde die Mischfarbe zu erkennen. Ich habe deshalb nach der bei den Contrasterscheinungen schon früher beschriebenen Methode von H. Meyer die zu combinirenden farbigen Felder mit feinem weissen Papier überdeckt, so dass durch das Papier die unterliegenden Farben nur schwach durchschimmerten. Als ich nun diese sehr weisslichen Farben zur Deckung brachte, glaubte ich in der That zuerst wirklich eine Mischfarbe zu sehen. Indessen wenn ich die wirkliche Mischfarbe der beiden Felder auch noch daneben brachte, erkannte ich wieder den Wettstreit der Sehfelder in den binocular gedeckten Feldern.

Zuweilen gelingt es, unter einer Auswahl farbiger und grauer Papiere einzelne zu finden, die genau die Mischfarbe zweier anderen, wie sie durch ein doppeltbrechendes Prisma hergestellt wird, darbieten; dann werden die Versuche noch leichter und schlagender. Ich legte neben einander ein Blatt von grünem und rosenrothem Glanzpapier, so dass ihre Grenzlinie vertical war. Quer darüber, also horizontal, legte ich einen Streifen grauen Papiers, welches der Mischfarbe von jenen beiden Farben entsprach. Das Ganze wurde mit feinem weissen Papier überdeckt. Wenn ich nun diese Felder mit einem doppeltbrechenden Prisma so ansah, dass die Doppelbilder horizontal auseinander geschoben wurden, so deckte sich längs des horizontalen grauen Streifens Grau mit Grau, darüber und darunter in der Mitte Rosa mit Grün, welche ebenfalls Grau gaben, und dieses letztere Grau ging ununterscheidbar über in das Grau des horizontalen Streifes. Wenn ich aber nach Entfernung des doppeltbrechenden Prisma binoculare Doppelbilder erzeugte, so hob sich der Streifen, wo Grau auf Grau lag, sehr entschieden ab von dem, wo Rosa auf Grün lag, und im letzteren erschienen wieder die beiden Farben neben einander. Nahm ich aber den mittleren grauen Streifen fort, so erkannte ich den Wettstreit der Sehfelder nicht mehr deutlich und bemerkte dann in diesem Felde nur das Gemeinsame beider Farben, nämlich das Weiss.

In andern Fällen sind es Nachbilder, die eine scheinbare Mischung hervorbringen. Dazu lässt sich sehr gut die eben beschriebene Anordnung benutzen: oben ein grauer Streifen, unten rechts grün, links rosenroth, welche beide letzteren Farben, durch das doppeltbrechende Prisma gemischt, das obere Grau geben. Ich bringe die beiden unteren Felder zur binocularen Deckung und sehe anfangs nur lebhaften Wettstreit zwischen ihnen. Wenn ich aber lange anhaltend fixire, fängt endlich das binocular gemischte Feld an, dem oberen Grau ähnlich zu werden, und nur wenig bald nach der Seite des Roth, bald nach der des Grün hin abzuweichen. Wenn ich aber nun das Roth mit Grün bedecke und dabei das eine oder andere Auge schliesse, so erscheint mir das Nachbild des Grün auf Grün, während in dem Theile des Feldes, wo vorher Rosa lag, jetzt das reine gesättigte Grün sichtbar wird. Da sieht man denn sehr deutlich, dass das durch Ermüdung veränderte Grün in der That dem Grau des oberen Streifens sehr ähnlich geworden ist. Dasselbe findet man am Rosaroth, wenn man das Grün verdeckt. Die scheinbare Mischung der Farben zu Weiss beruht also in diesem Falle darauf, dass die Farben selbst in der Empfindung in Folge der entstehenden complementären Nachbilder dem Grau viel ähnlicher geworden sind, und dass der Unterschied und Wettstreit der einander ähnlich gewordenen Farben zuletzt nicht mehr so auffällt, wie der der ursprünlichen lebhaften.

In gewissen Fällen kann die auf S. 401 erwähnte Induction der Farbe des Grundes über ein kleines andersfarbiges Feld scheinbare binoculare Mischung hervorbringen. Ich betrachtete einen blauen horizontalen Streifen auf rothem Grunde längere Zeit in Doppelbildern in starrer Fixation, indem ich ein schwarzes auf dem Blau angebrachtes Pünktchen mit einem ebensolchen auf dem Roth binocular vereinigte. Anfangs sah ich nur den Wettstreit des Roth und Blau auf dem Theil des Feldes, wo sich Roth und Blau deckte. Endlich aber bemerkte ich, dass wirkliches Violett eintrat. Als ich aber nun das eine Auge schloss, erkannte ich das inducirte Roth auch monocular auf dem blauen Streifen.

Am auffallendsten endlich finde ich den Schein einer binocularen Mischung in einem schon von H. Meyer und Panum [1] besprochenen Falle. Es befinde sich rechts ein gelbes Feld, auf dem horizontal ein rosenrother Streifen liegt, links ein blaues mit einem verticalen Streifen von demselben Rosenroth. Man bringe das gelbe und blaue Feld zur binocularen Deckung, so dass die beiden rosenrothen Streifen sich scheinbar kreuzen, so erscheint der linke, welcher grösstentheils auf das gelbe Feld fällt, allerdings viel gelblicher, als der rechte, der sich grösstentheils mit dem blauen Felde deckt. In der Mitte, wo beide Felder sich kreuzen, sieht man reines Rosenroth, oder vielmehr, wie mir scheint, das gelbliche Rosenroth des einen geht hier unter dem bläulichen Rosenroth des anderen Streifens gleichsam unverschmolzen hindurch. Panum betrachtet die gelbliche Färbung des einen Rosenroth, die bläuliche des anderen als Folge ihrer binocularen Mischung mit der Farbe des gegenüber stehenden

[1] Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel 1858. S. 41, Fig. 27 und 29.

Feldes. Zu beachten ist hierbei, dass die Veränderung der beiden rosarothen Streifen am lebhaftesten wird, wenn man den Blick wandern lässt, weil dann der auf Gelb liegende das blaue Nachbild des Gelb bekommt, der auf Blau liegende das gelbe Nachbild des Blau. Aber in schwächerem Grade ist die Wirkung allerdings auch bei fest fixirendem Blick vorhanden. Doch kann man auch in diesem Falle sich überzeugen, dass man es hier zunächst mit einer Contrastwirkung zu thun hat. Die veränderte Färbung des Rosaroth bleibt nämlich auch bestehen, wenn man durch Schluss des anderen Auges die binoculare Mischung aufhebt. Man schliesse das rechte Auge, welches nach dem gelben Felde gerichet ist, so bleibt der rosenrothe Streif auf dem noch übrigen blauen Felde so gelblich, wie er vorher war. Im Moment des Augenschlusses verschwindet freilich noch das ihn binocular deckende Gelb, wie eine Art gelben Nebels, durch welchen hin man ihn sah, aber die scheinbare Färbung des Rosenroth selbst bleibt dabei ganz unverändert. Ebenso erscheint der rosenrothe Streif auf dem Gelb unverändert bläulich roth, wenn man auch das nach dem Blau blickende linke Auge schliesst. Daraus folgt also, dass die Veränderung des Rosa nicht oder wenigtens nicht allein, von binocularer Mischung herrührt, sondern eine Contrastwirkung ist. Schon von Anfang an, auch bei monocularer Betrachtung, erscheint das Rosa auf dem blauen Felde durch Contrast gelblicher, das auf dem gelben Felde bläulicher. Sobald man die beiden Felder zur Deckung bringt, wird die Contrastwirkung allerdings viel lebhafter; ist sie aber einmal so lebhaft entwickelt, so schwindet sie auch nicht wieder, wenn man selbst ein Auge schliesst und somit die binoculare Deckung aufhebt. Bei jedem Contraste ist die Beurtheilung der Farbe, wie wir uns im 24. Paragraphen zu zeigen bemühten, innerhalb eines gewissen Intervalls unsicher. Nebenumstände bewirken, dass man die gesehene Farbe eher nach der einen Seite dieses Intervalls, als nach der anderen verlegt. Bei dem hier besprochenen Versuche kann die binoculare Deckung mit der Complementärfarbe des Grundes, auf dem der rosarothe Streifen liegt, wohl als ein solcher Nebenumstand betrachtet werden. Uebrigens komme ich unten noch auf die Lehre von den binocularen Contrasten wieder zurück.

Was die Theorie der binocularen Zusammensetzung der Farben betrifft, so ist diese, wenn wir von Th. Young's Farbentheorie ausgehen, von ihrer monocularen Mischung nur dadurch unterschieden, dass die den drei verschiedenen Grundfarben entsprechenden Nervenfasern, welche in verschiedenem Grade gereizt werden, dort auf beide, hier nur in einer Netzhaut vertheilt sind. Die drei verschiedenartigen Nervenfasern, welche demselben Punkte einer Netzhaut angehören, haben entweder dasselbe Localzeichen, oder wenn sie verschiedene Localzeichen haben, so kann doch keine mögliche Erfahrung vorkommen, bei der sie durch Objecte, die in verschiedenen Theilen des Gesichtsfeldes lägen, erregt würden. Eine Veranlassung zu getrennter Localisation dieser Empfindungen in Bezug auf die Richtungen im Sehfeld kann also nicht vorkommen. Ihre verschiedenen Empfindungen verschmelzen also in eine zusammengesetzte Empfindung, die Empfindung einer Mischfarbe, welche der Regel nach als das sinnliche Zeichen für eine bestimmte Beschaffenheit des örtlich einfachen Ob-

jects auftritt, das sich in jenem Theile des Sehfeldes befindet. Und doch haben wir gesehen, dass auch bei monocularer Mischung Fälle eintreten, wo wir eine der zusammengesetzten Farben durch die andere hindurch zu sehen glauben, wenn entweder die ungleichmässige Vertheilung des Lichts, oder die Bewegung eines örtlich begrenzten Bildes, oder die Anwesenheit eines Theils der Farbe im ganzen Gesichtsfelde uns darauf hinleiten eine farbige Beleuchtung oder eine farbige Decke von einem farbigen Objecte zu trennen.

Bei ungleichartiger Beleuchtung correspondirender Theile beider Netzhäute ist nun der Eindruck ein solcher, wie er bei einer von allen Seiten gleichmässigen Beleuchtung eines einfachen Objects niemals vorkommen kann. Dennoch versetzen wir (aber wahrscheinlich nicht in Folge einer angeborenen Einrichtung unseres Nervensystems, sondern nur in Folge von Einübung) beide Farben in eine und dieselbe Gegend des gemeinsamen Gesichtsfeldes. So sieht man also zwei Farben in dem gleichen Felde und empfindet jede getrennt von der andern. Am ähnlichsten ist dieses Gesichtsbild jedenfalls denjenigen Fällen monocularer Mischung, wo wir zwei farbige Objecte hinter einander in der gleichen Stelle des Sehfeldes sehen oder zu sehen vermeinen, und von einer Zahl der Beobachter, wozu ich mich selbst rechnen muss, wird die Sache also auch jedenfalls nur so gesehen. Dabei tritt das Schwanken der Aufmerksamkeit ein, die sich entweder dem einen oder anderen Felde zuwendet, und giebt sich als Wettstreit zu erkennen. Etwas dem Wettstreit ähnliches, nur sehr viel schwächer entwickelt, kann man übrigens auch im monocularen Felde sehen, wenn man mittels einer unbelegten Glasplatte das Spiegelbild eines Objectes mit dem durch die Platte gesehenen anderen Objecte zum Decken bringt, vorausgesetzt dass beide nahehin gleich hell und deutlich gezeichnet sind, aber ganz verschiedenes Muster haben. Dann kann man entweder das eine oder andere Object betrachten, das nicht beachtete tritt auch in diesem Falle mehr zurück, wenn es auch nie so vollständig schwindet, wie bei binocularer Deckung. Durch kleine Bewegungen der reflectirenden Platte kann man sich nöthigenfalls die Trennung der beiden Bilder sehr erleichtern.

Da übrigens nach Young's Theorie die Anschauung von Mischfarben doch immer nur darauf beruht, dass drei verschiedene Farbenempfindungen in dieselbe Stelle des Sehfeldes hinein projicirt werden, und es selbst bei monocularer Mischung nur auf einem je nach den Nebenumständen verschieden ausfallenden Acte des Urtheils beruht, ob dieselben als sinnliches Zeichen einer einfachen Qualität eines Objects oder zweier verschiedenen Qualitäten zweier Objecte angesehen werden, so erscheint es andererseits nicht unmöglich, dass bei der binocularen Deckung zweier Farben von der Verschiedenheit, welche zwischen dieser Art des Eindrucks und dem der monocularen Mischung stattfindet, abgesehen werde, und die Farben so vereinigt wie bei letzterer angesehen werden. Nach Young's Farbentheorie ist die Mischfarbe ja auch weiter nichts als die Addition dreier verschiedenartiger, sich sonst gegenseitig nicht beeinflussender Eindrücke, welche dieselbe Localisation haben, und die Urtheilsacte, nach denen bald Vereinigung, bald Trennung eintritt, können bei verschiedenen Beobachtern je nach Einübung und verschiedener individueller Erfahrung natürlich sehr ver-

schieden ausfallen. Dass dabei die Vereinigung sehr ähnlicher Farben, die also viel Gemeinsames und wenig Verschiedenes haben, leichter erfolgen kann, als die sehr verschiedener, ist an und für sich selbstverständlich. Dazu kommt auch noch, dass kleine Verschiedenheiten des Eindrucks auf beide Augen häufig auch bei Betrachtung desselben reellen Objects vorkommen können, wenn dass eine Auge mehr ermüdet oder ausgeruht ist als das andere, oder wenn seitlich sehr helles oder farbiges Licht einfällt, welches in ihm zerstreut wird, und so weiter. Die Ausgleichung solcher kleinerer Verschiedenheiten kann also zur Sache der Gewohnheit werden und übersehen werden. Wenn man freilich ein Feld, welches einen solchen Eindruck darbietet, dicht neben ein anderes stellt, in welchem zwei gleiche Farben zur Deckung kommen, so erkennt man die Verschiedenheit und bemerkt den Wettstreit, der auch zwischen wenig differenten Eindrücken vor sich geht.

In ganz eigenthümlicher Weise endlich macht sich die binoculare Combination verschieden farbiger oder verschieden beleuchteter Felder geltend in stereoskopischen Zeichnungen. Macht man nämlich in dem einen von zwei zusammengehörigen Bildern eines Körpers eine Fläche weiss, die man in dem andern Bilde schwarz lässt, oder giebt man ihnen verschiedene, am besten nicht zu sehr verschiedene Farben, so erscheint eine solche Fläche in der stereoskopischen Combination g l ä n z e n d, während alle diejenigen Theile des Körpers, die in beiden Zeichnungen gleiche Färbung und Beleuchtung haben, m a t t erscheinen. Uebrigens ist dieser Schein des Glänzenden oder Matten durchaus unabhängig davon, ob die Flächen der Zeichnung wirklich matt oder glänzend sind, vorausgesetzt, dass sie im letzteren Falle nicht gespiegeltes Licht in das Auge des Beobachters zurückwerfen.

Man kann sogar stereoskopische Linienzeichnungen, zum Beispiel von Krystallmodellen, einerseits mit schwarzen Linien auf weissem Grunde, andererseits mit weissen Linien auf schwarzem Grunde ausführen und solche Zeichnungen stereoskopisch combiniren. Man erhält dabei den Eindruck, als wäre der Körper, den man sieht, aus einer dunklen glänzenden Masse, wie Graphit, ausgeführt und läge auf einer Fläche von Graphit. Ein solches Beispiel zeigt *Fig. Q, Taf. IX.*

Auch in photographischen Stereoskopbildern von glänzenden Gegenständen, z. B. glänzenden Pflanzenblättern, Atlas u. s. w., wird man häufig Stellen finden, welche in beiden Zeichnungen verschieden helle Reflexe zeigen und in dem combinirten Bilde den Eindruck des Glanzes hervorrufen. Am ausgezeichnetsten vielleicht ist dieser Eindruck auf momentanen Photographien einer welligen, von der Sonne beschienenen Wasserfläche. Ebenso wird man sich bei Betrachtung objectiver glänzender Körper sehr oft überzeugen können, dass einzelne Stellen derselben dem einen Auge einen viel stärkeren Reflex zusenden als dem andern.

Hierin scheint mir auch der Grund zu liegen, warum in stereoskopischen Zeichnungen verschieden beleuchtete Flächen combinirt glänzend erscheinen. Wenn eine matte Oberfläche von Licht getroffen wird, so sendet sie dieses Licht gleichmässig nach allen Richtungen in der Weise zurück, dass sie von allen Richtungen aus gesehen gleich hell erscheint. Folglich wird sie auch unter

den normalen Bedingungen des Sehens unseren beiden Augen immer gleich hell erscheinen. Glänzende Flächen dagegen sind solche, die eine mehr oder weniger regelmässige spiegelnde Reflexion zeigen. Sie können eine Menge grösserer oder kleinerer hügeliger Unebenheiten zeigen; wenn die Oberfläche dieser Hügel polirt ist und überwiegend einer bestimmten Richtung sich nähert, so werden sie doch auffallendes Licht in überwiegender Menge in derjenigen Richtung zurückwerfen, in der eine regelmässig spiegelnde Fläche alles Licht zurückwerfen würde. Unter diesen Umständen wird es oft vorkommen, dass eines unserer Augen sich in der Richtung des zurückgeworfenen Lichts befindet, das andere nicht. Dem ersteren erscheint dann die betreffende Fläche stark erleuchtet, dem anderen schwach. Sehen wir also im Stereoskope an dem Bilde eines Körpers eine Fläche mit beiden Augen verschieden stark erleuchtet, so erhalten wir einen sinnlichen Eindruck, den in Wirklichkeit nur glänzende, aber niemals matte Flächen hervorbringen können, und die betreffende Fläche erscheint uns deshalb glänzend.

Ebenso kann es vorkommen, dass ein glänzender Körper, der von farbigen umringt ist, dem einen Auge reflectirtes Licht von einer, dem andern von anderer Farbe zusendet, also beiden Augen verschiedenfarbig erscheint, während ein matter Körper unter den normalen Bedingungen des Sehens nothwendig beiden Augen immer gleichfarbig erscheinen muss. Wenn also im Stereoskop dieselbe Fläche in der einen Zeichnung anders gefärbt ist als in der andern, so erregt uns das einen sinnlichen Eindruck, wie ihn nur glänzende Körper hervorbringen können. Da sich in der Regel die Farbe des glänzenden Körpers selbst mit der der beiden Reflexe mischt und die letzteren selten ganz rein nur die eine Farbe reflectiren, so sind die Unterschiede in der Färbung solcher Reflexe glänzender Körper für beide Augen in der Regel nicht sehr gross, und dem entsprechend gelingt es besser Glanz hervorzubringen durch Verbindung von Farben, die nicht sehr verschieden sind, als durch sehr glänzende und sehr differente. Letztere lassen mehr Wettstreit als Glanz sehen.

Nach den Beobachtungen von Wundt tritt der Glanz in der Combination zweier farbigen Felder am besten hervor, wenn beide ungefähr gleich stark mit dem Grunde, auf dem sie liegen, contrastiren, schwächer, wenn eines viel stärker contrastirt; dann überwiegt nämlich dasselbe im Wettstreite der Sehfelder zu sehr und unterdrückt das andere. Legt man zum Beispiel ein helles gelbes und ein dunkles blaues Quadrat von gleicher Grösse auf weissen oder schwarzen Grund, und bringt sie zur binocularen Deckung, so unterscheidet sich im einen Falle das Gelb zu wenig vom weissen Grunde, im andern das Blau zu wenig vom schwarzen Grunde, und der Glanz ist viel schwächer, als wenn man beide Quadrate auf grauen Grund legt, der sich von beiden gleich stark unterscheidet.

Auch dadurch, dass man auf dem einen Quadrate Zeichnungen mit scharfen Contouren anbringt, kann man dieses im Wettstreit so begünstigen, dass die Erscheinung des Glanzes undeutlich wird.

Auch kann man binocularen Glanz hervorbringen, ohne gerade stereoskopische Zeichnungen zu benutzen, wenn man durch zwei verschieden gefärbte Gläser nach buntgefärbten Objecten hinsieht, zum Beispiel durch ein blaues und

ein rothes Glas nach einem in Blau und Roth ausgeführten Muster. Durch jedes Glas erscheint die gleichnamige Farbe hell, die andere dunkel, und man sieht das Muster sehr auffallend glänzend. Wichtig ist dabei die Bemerkung von Dove, dass, wenn im Wettstreit der Augen die eine oder andere Farbe sich ganz hervordrängt, der Glanz verschwindet, im Moment des Uebergangs aber, wo beide neben einander sichtbar sind, der Glanz auftritt.

Der Metallglanz ist dadurch charakterisirt, dass das regelmässig reflectirte Licht selbst schon gefärbt und nicht weiss ist, wie das der durchsichtigen Stoffe. Metallglanz kommt deshalb auch Körpern zu, welche die Farben dünner Blättchen geben, wie bunte Vogelfedern, und gewissen stark gefärbten und brechenden Stoffen, wie Indigo.

Die Erscheinung des stereoskopischen Glanzes ist für die Theorie der Thätigkeit beider Netzhäute deshalb von Interesse, weil daraus mit Sicherheit hervorgeht, was bei den verschiedenen Aussagen verschiedener Beobachter über die Erfolge der binocularen Deckung verschiedener Bilder vielleicht zweifelhaft bleiben könnte, dass zwei heterogene Lichtwirkungen auf correspondirende Netzhautstellen stets einen durchaus andern sinnlichen Eindruck machen, als zwei gleichartige Einwirkungen auf dieselben Stellen. Wenn das eine Auge Schwarz sieht und das andere in dem correspondirenden Theile des Sehfeldes Weiss, so ist der sinnliche Eindruck der einer glänzenden weisslichen Fläche. Wenn wir aber das weisse Licht, was bisher auf die eine Seite allein fiel, auf beide Seiten gleichmässig vertheilen, also Grau mit Grau combiniren, so giebt das den Eindruck von mattem Grau, welcher ganz bestimmt unterschieden ist von dem Eindruck des glänzenden Weiss, den die erste Combination machte.

Dasselbe gilt für den durch binoculare Vereinigung verschiedener Farben erzeugten Glanz.

Man kann zwar denselben Schluss schon aus der Thatsache ziehen, dass zwei stereoskopische Zeichnungen, binocular combinirt, nicht so erscheinen, als wären alle Linien auf dasselbe Blatt aufgetragen, sondern den Eindruck eines Körpers geben. Indessen ist hierbei allerdings der Einfluss der Augenbewegungen von Wichtigkeit, und nur bei momentaner Beleuchtung durch den elektrischen Funken fällt dieser ganz weg.

Ich bemerke noch, dass ich auch solche Zeichnungen, welche stereoskopischen Glanz zeigen, bei der Beleuchtung durch den elektrischen Funken betrachtet habe, und dass auch hierbei der Eindruck des Glanzes vollkommen zur Erscheinung kommt. Diese Thatsache ist wichtig, weil dadurch die Erklärung beseitigt wird, dass der Glanz auf dem Wechsel der Beleuchtung und Färbung beruht, den der Wettstreit verursacht. Den Wechsel im Wettstreit bei nicht angestrengter Aufmerksamkeit habe ich nie schneller als in Perioden von etwa 8 Secunden, meist aber sehr viel langsamer vor sich gehen sehen. Wenn nun auch der Lichteindruck in der Netzhaut einen kleinen Bruchtheil einer Secunde dauert, so ist während dieser Zeit keine merkliche Aenderung durch den Wettstreit der Sehfelder möglich. Man kann aber in dieser kurzen Zeit erkennen, dass man die beiden verschiedenen Eindrücke beider Sehfelder gleichzeitig und in derselben Stelle des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes sieht.

Den Eindruck des Glanzes können übrigens auch monocular gesehene Bilder und Objecte hervorbringen, zum Beispiel dadurch, dass ihre Beleuchtung bei Bewegungen des Beobachters sich schnell verändert; dabei kommen die Elemente, aus denen sich der stereoskopische Glanz zusammensetzt, nicht gleichzeitig, aber schnell hinter einander zur Beobachtung. Ferner erscheinen bewegte Objecte glänzend, wenn die Beleuchtung ihrer einzelnen Theile schnell hinter einander sich verändert, wie es zum Beispiel bei einer bewegten Wasserfläche geschieht. Es genügt selbst, wenn nur die verschiedenartige Beleuchtung der Theile einer Fläche die bekannten Formen der Lichtreflexe unvollkommen spiegelnder Körper nachahmt. Wundt hat monocularen Glanz hervorgebracht, indem er ein dunkles Quadrat auf andersfarbigem dunklen Grunde durch eine unbelegte Glasplatte betrachtete, deren Vorderseite gleichzeitig ein helleres Quadrat auf hellerem Grunde spiegelte, so dass die Spiegelbilder mit dem erstgenannten sich nahehin deckten. Der Glanz verschwand, wenn das gespiegelte Quadrat scheinbar genau an demselben Orte sich befand, wie das wirklich dort vorhandene, dann sah man nur die Mischfarbe. Der Glanz kam aber zum Vorschein, wenn das gespiegelte scheinbar hinter dem wirklichen lag. Lag es vor ihm, so schien eher das gespiegelte zu glänzen. Es wurde hierbei also die Anschauung hervorgebracht, als sähe man hinter und durch das wirklich vorhandene Quadrat noch ein anderes, was dann als ein von ersterem entworfenes Spiegelbild erschien, und das gab den Anschein des Glanzes. Diese Versuche zeigen besonders gut, dass es hier nicht auf besondere Qualitäten der Färbung ankommt, sondern darauf, die Täuschung hervorzubringen, als reflectirte eine gesehene Fläche noch ein anderes Bild.

Der Schein der Durchsichtigkeit tritt auch bei binocularer Deckung zweier verschiedenfarbiger Felder zuweilen ein, worauf Wundt aufmerksam machte. Bringt man zum Beispiel ein helles gelbes und dunkleres blaues Quadrat auf weissem Grunde zu einer unvollständigen binocularen Deckung, so erscheint das Blau da, wo man die Grenze des Gelb und Weiss von ihm gedeckt sieht, durchsichtig. Dagegen fehlt dieser Schein, wo das Gelb die Grenze von Blau und Weiss deckt. Auf schwarzem Grunde erscheint dagegen das Gelb durchsichtig. Das stärker mit dem Grunde contrastirende Feld erscheint überhaupt der Regel nach als das durchsichtige, entsprechend dem objectiven Verhältniss, wonach etwas, was durch ein durchscheinendes Medium, dessen Substanz selbst deutlich wahrgenommen wird, gesehen wird, immer nur undeutlich gesehen wird, während die Grenzen dieses Mediums, unbedeckt von anderem durchscheinenden, sich der Regel nach scharf markiren werden.

Es sind schliesslich noch einige Erscheinungen zu besprechen, welche als Contrast zwischen den Empfindungen beider Augen auszulegen sind, oder wenigstens ausgelegt werden können.

Zunächst hat namentlich Fechner darauf aufmerksam gemacht, wie ausserordentlich gut kleine Unterschiede der augenblicklichen Farbenstimmung beider Augen, d. h. der Weise, in welcher die Augen die Farben empfinden, wahrgenommen werden, wenn man nach einem kleinen hellen Objecte auf schwarzem Grunde sieht und dessen binoculares Bild durch veränderte Augenstellung

in Doppelbilder auseinander schiebt. Ist das eine Auge zum Beispiel geschlossen gewesen und hat das andere während der Zeit helle weisse Flächen angesehen, so erscheint unmittelbar hinterher von den zwei Doppelbildern eines weissen Streifens auf schwarzem Grunde dasjenige, welches dem ermüdeten Auge angehört, dunkler und auch violetter als das andere, welches dem vorher ausgeruhten Auge angehört. Hat man dagegen mit dem freien Auge nach einer farbigen Fläche gesehen, so erscheint dessen Bild nachher in der Complementärfarbe, das andere der inducirenden Farbe gleichfarbig. Hierbei ist die Complementärfarbe in dem ermüdeten Auge in der Vergleichung der beiden Doppelbilder sehr viel länger sichtbar, als wenn man beide Augen nach derselben farbigen Fläche hat blicken lassen und in beiden daher die gleiche Farbenstimmung nachbleibt. So ist es zum Beispiel ohne dieses Hilfsmittel der Doppelbilder sehr schwer zu erkennen, dass das Nachbild einer mässig erleuchteten weissen Fläche eine bläuliche Färbung hat, während dieser Umstand in der Vergleichung mit dem Doppelbilde des ausgeruhten Auges, welches hell orangegelb erscheint, sogleich sichtbar wird. Ist der Unterschied der Helligkeit beider Bilder zu gross, so kann man die Vergleichung sehr erleichtern, wenn man das des freien Auges entsprechend verdunkelt, indem man entweder durch eine feine Oeffnung in einem schwarzen Papierblatte blickt, oder durch ein doppelbrechendes Prisma, welches zwei Bilder des hellen Streifens, jedes von halber Helligkeit des directen Bildes zeigt, oder auch durch ein farbloses graues Brillenglas, von dessen Farblosigkeit man sich vorher überzeugt hat.

Es geht aus diesen Versuchen hervor, dass die Vergleichung zwischen den Farbenempfindungen nahehin correspondirender Stellen beider Netzhäute mit grosser Genauigkeit geschehen kann, scheinbar sogar mit grösserer Genauigkeit und viel längere Zeit hindurch, als dies der Fall ist, wenn die beiden Farben durch die entsprechenden Stellen einer Netzhaut verglichen werden sollen. Um nämlich die Farbe, in der die Netzhaut zum Beispiel Weiss empfindet, zu vergleichen mit der, in der es die nicht ermüdete thut, muss man durch starres Fixiren eines weissen Objects auf schwarzem Grunde ein scharf gezeichnetes Nachbild entwickeln und dies nachher auf gleichmässig weissem Grunde betrachten. Abgesehen davon, dass die Anstrengung des starren Fixirens ziemlich beträchtlich ist und vielleicht Einfluss auf den Verlauf des Processes hat, abgesehen ferner davon, dass man den Vortheil nicht hat, das helle Bild beliebig verdunkeln zu können, so verschwinden die begrenzten Nachbilder auf einer Netzhaut auch bald für die Wahrnehmung, weil wir überhaupt gleichbleibende Helligkeits- oder Farbenunterschiede zwischen zwei verschiedenen Netzhautstellen, die durch Wechsel nicht aufgefrischt werden, schwer bemerken.

Wir haben im §. 24 gesehen, dass wir geneigt sind, deutlich wahrnehmbare Unterschiede der Helligkeit und Farbe für grösser zu halten, als undeutlich wahrnehmbare, und dass der grössere Theil der sogenannten Contrasterscheinungen hierauf zurückzuführen ist. Eine solche Contrastwirkung äussert sich nun im vorliegenden Falle dadurch, dass auch das unveränderte Bild sich im Gegensatze zu dem veränderten färbt, erhellt oder verdunkelt. So sieht das reine Weiss des unermüdeten Auges gelb aus, neben dem violetten Grau des durch

Weiss ermüdeten, oder ersteres grün, wenn das letztere durch das Nachbild von Grün rosaroth gefärbt ist u. s. f.

Statt das eine Doppelbild durch ein Nachbild zu färben, kann man es auch direct durch ein farbiges Glas färben, welches man vor das betreffende Auge bringt. Aber ich finde auch hier, was wir schon oben für die Contrasterscheinungen als charakteristisch fanden, dass eine schwache Farbe eine viel deutlichere Contrastwirkung hervorbringt, als eine sehr gesättigte. Grünliches Fensterglas oder gelbröthliches Bouteillenglas zeigt die complementäre Farbe auf dem jenseitigen Doppelbilde viel deutlicher, als wenn man durch sehr tief gefärbtes Glas blickt, selbst wenn man im letzteren Falle das Bild des anderen Auges durch passende graue Gläser auf dieselbe Lichtstärke herunterbringt, als das farbige Bild.

Ja es ist sogar ein Contrast möglich zwischen solchen Farben, die auf correspondirenden Stellen beider Netzhäute liegen. Man lege einen schwarzen Streifen auf einen weissen Grund, schiebe sein Bild zu Doppelbildern auseinander und bringe dann vor das eine Auge ein blaues, vor das andere ein graues Glas, welche beide ungefähr gleich dunkel sind. Man sieht dann das eine Bild des schwarzen Streifen umgeben von hervortretendem Blau, das andere von hervortretendem Weiss, während im übrigen Grunde Blau und Weiss mehr oder weniger gleichmässig über einander lagern. Dabei zeigt sich das Weiss, was längs der Contour des schwarzen Streifens hervortritt, entschieden gelblich. Nimmt man beide Gläser fort, so erscheint gelbliches Weiss, wo vorher Blau vorherrschte, und bläuliches Weiss, wo wir es vorher gelblich sahen.

Vertauschen wir bei diesem Versuche die blaue Glasplatte mit einer gelben, so wechselt auch in den Bildern überall Gelb mit Blau.

Es muss wohl als sehr auffallend betrachtet werden, dass unter dem Einfluss der Contoure des Schwarz unsere Aufmerksamkeit sich dem benachbarten Weiss so ausschliesslich zuwendet und es von dem im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde überdeckenden Blau so vollständig trennt, dass dieses Weiss sogar gelblich aussehen kann. Dies gelbliche Weiss zeigt übrigens auch darin seinen Charakter als Contrastfarbe, dass es kurze Zeit stehen bleibt, selbst wenn wir das Auge hinter dem blauen Glase ganz schliessen. Auch bei den farbigen Schatten (S. 394) fanden wir, dass das einmal über die Art der Farbe festgestellte Urtheil bestehen blieb, selbst nachdem die contrastirende Farbe, deren Anwesenheit zu dem Irrthume verleitet hatte, aus dem Gesichtsfelde entfernt war.

In den bisherigen Versuchen fand der Contrast statt in der Vergleichung zweier Farben, welche den entgegengesetzten Gesichtsfeldern angehören. Es kann nun aber auch die Wirkung monocularen Contrastes durch binoculare Vergleichung mit dem entgegengesetzten Contraste gesteigert werden. Man lege rechts einen Bogen rosarothen, links einen Bogen grünen Papiers, so dass beide in der Mitte an einander stossen; ferner lege man nahe der Grenzlinie auf jede Seite einen Streifen weissen Papiers. Betrachtet man diese beiden Streifen mit freien Augen, so ist in der Regel gar keine Contrastfärbung an den beiden Papierstreifen zu bemerken, wenn nicht schon starke Nachbilder der beiden Farben entwickelt sind. Blickt man mit einem Auge durch eine

schwarze Röhre nach einem dieser Streifen, während das andere Auge geschlossen ist, so bemerkt man allerdings eine schwache complementäre Contrastfärbung. Hält man aber zwei schwarze Röhren vor beide Augen, so dass das rechte den einen Streifen mit einem Stück des rothen Grundes, das linke den anderen mit einem Stück des grünen Grundes sieht, ohne dass man übrigens die Streifen binocular zum Decken bringt, so treten die complementären Färbungen der beiden Streifen in einer sonst kaum beobachteten Stärke auf. Die Wirkung nimmt an Stärke immer mehr zu, wenn man den Versuch längere Zeit fortsetzt, ohne den Blick auf einen bestimmten Punkt festzuheften. Dabei entstehen natürlich immer stärkere Nachbilder des Grundes, und da das rechte Auge nur rothen, das andere nur grünen Grund sieht, so kann bei allen Bewegungen des Auges sich im rechten Auge immer nur Grün, im linken immer nur Roth als Grund entwickeln und die Contrastwirkung nur verstärken.

Dies wäre nun ein successiver Contrast, einer der auf Nachbildern beruht. Wenn man zu Anfang des Versuchs schnell die Augen auf die weissen Streifen hinwendet und sie möglichst schnell in der richtigen Lage fixirt, so sieht man ebenfalls, wenn auch viel schwächer die Contrastfarben. Indessen da unter den Umständen dieses Versuchs Nachbilder des Grundes durch die Vergleichung der Färbung in beiden Sehfeldern besonders leicht sichtbar werden, so hielt ich es für nöthig, eine Versuchsweise zu suchen, welche ganz sicher vor jeder Entstehung eines Nachbildes des Grundes schützte. Zu dem Ende befestigte ich auf einer Glasplatte zwei Papierstreifen, parallel zu einander in senkrechter Richtung, von denen der rechte oben schwarz und unten grau, der linke oben grau und unten schwarz war. Die Glastafel brachte ich über eine rechts mit rothem, links mit grünem Papier belegte Fläche, so dass der rechte Papierstreifen über rothem, der linke über grünem Grunde lag. Vor dem Beginn des Versuchs schob ich aber weisses Papier zwischen die Glastafel und die farbige Fläche, so dass die letztere ganz verdeckt war. Nun fixirte ich mit beiden Augen die grauschwarzen Streifen so, dass sie sich deckten, wobei sowohl die obere als untere Hälfte des Bildes aus der Deckung einer schwarzen und einer grauen Streifenhälfte besteht. In der Mitte jedes Streifens hatte ich einen weissen Punkt angebracht als Fixationspunkt. Indem ich die beiden weissen Punkte binocular vereinigte, war ich im Stande, das gemeinsame Bild der grauschwarzen Streifen ganz sicher festzuhalten. Wenn ich nun das weisse Papier entfernte, so dass die farbige Fläche dahinter zum Vorschein kam, so entstanden allerdings Spuren einer Contrastfärbung, die aber ausserordentlich schwach waren. Das Grau, welches auf grünem Grunde lag, erschien röthlich, das auf rothem Grunde befindliche grünlich. Dagegen genügten wenige kurze Bewegungen des Blicks von rechts nach links und zurück, um die Contrastfarben gleich in voller Intensität zum Vorschein zu bringen. Die anfänglichen schwachen Contrastfärbungen waren schwächer, als sie beim monocularen Contrast zum Vorschein kommen. Noch schwächer war die Wirkung, wenn das Grau durch Weiss ersetzt wurde.

Die reinen Wirkungen des simultanen Contrastes auf den beiden grauen

Streifen wurden also geschwächt durch die binoculare Vergleichung. Indem das Grau des einen Sehfeldes dem des anderen binocular genähert wurde, wurde eine genauere Vergleichung zwischen den beiden Grau möglich, als vorher im monocularen Felde, wo die beiden Streifen durch weite Strecken Grün und Roth von einander getrennt waren. In dieser Beziehung verhalten sich also die Erscheinungen des successiven Contrastes, welche auf einer Veränderung der Empfindung durch Nachbilder beruhen, ganz anders, als die des simultanen Contrastes, welche wir als Irrthümer des Urtheils aufgefasst haben. Erstere treten durch binoculare Vergleichung auffallender hervor, letztere werden im Gegentheil berichtigt.

Bei der bisher beschriebenen Form des Versuchs wurde eine binoculare Deckung der grauen Streifen mit farbigem Grunde vermieden, sie deckten sich vielmehr mit Schwarz. Nun kann man aber durch veränderte Convergenz der Augen ihre Bilder so weit aneinander schieben, dass sie sich nicht decken, sondern nur berühren. Bringt man sie in diese scheinbare Lage, während zunächst noch der weisse Bogen darunter liegt, überzeugt sich dabei von dem gleichen Aussehen des Grau an beiden Streifen und nimmt dann das weisse Papier fort, um den farbigen Grund sichtbar zu machen, so erscheint der von Roth umgebene Streifen, der sich binocular mit Grün deckt, entschieden grün, der andere, der von Grün umgeben ist und sich mit Roth deckt, ebenso entschieden roth. Man erhält ganz frappant den Eindruck, als fände eine binoculare Mischung des Grau mit den beiden Farben des Grundes statt. Schiebt man den weissen Bogen wieder unter die Glasplatte, so schwinden augenblicklich die Färbungen, wie es bei einer Mischung der Farben des Grundes mit dem Grau sein müsste.

Aber ein anderer Versuch zeigt, dass wir es hier nicht mit einer Mischung zu thun haben. Schliesse ich das rechte Auge, wenn ich die Streifen complementärgefärbt vor mir sehe, so bleibt nur der von Grün umgebene Streif sichtbar, und obgleich eine Art rothen Schleiers sich von ihm zurückzieht, nämlich das ihn binocular deckende Roth, so bleibt seine Körperfarbe, das Grau, doch so röthlich, als es vorher war; das wäre nicht möglich, wenn das röthliche Aussehen des Grau nur auf einer (binocularen) Mischung mit Roth beruhte. So wie aus der Mischung das Roth fortfiele, müsste sich die ursprüngliche Farbe herstellen und eher durch den Contrast grünlich werden. Ich glaube vielmehr, dass der Erfolg dieser Versuche so zu erklären ist: Wir haben vorher gesehen, dass wenn in beiden Sehfeldern Grau enthalten ist und sich beides binocular mit Schwarz deckt, wir den Farbenton der beiden Grau sehr genau vergleichen können, und dass durch diese unmittelbare Vergleichung der beiden Grau Wirkungen monocularen Contrastes, die uns geneigt machen könnten, die beiden Grau für verschiedenartig zu halten, geschwächt werden. In dem letztbeschriebenen Versuche dagegen deckt sich Grau, welches von Roth umgeben ist, und welches wir deshalb geneigt sind, für grünlich zu halten, binocular mit Grün, und das andere durch Contrast mit der grünen Umgebung röthlich gefärbte Grau deckt sich binocular mit Roth. Hier kann diese binoculare Deckung der beiden Flächen, welche zu vergleichen sind mit zwei ver

schiedenen und lebhaften Farben die Vergleichung sehr unsicher machen und daher den Contrast verstärken.

Schiebt man nachher eine weisse Fläche unter, an der die Augen ihr Urtheil über das Weiss wieder berichtigen können, so schwindet augenblicklich der Contrast. Auch wenn eine schwarze untergeschoben wird, so ist sogleich eine genaue und ungefälschte Vergleichung der beiden grauen Streifen möglich, welche den Contrast derselben schwinden macht. Wenn man dagegen nur ein Auge schliesst, so treten keine Momente ein, die das Urtheil berichtigen könnten, und der Contrast bleibt bestehen.

Wir können das Resultat der bisher beschriebenen Versuche dahin zusammenfassen: Wenn im binocularen Felde das rechte Auge das Bild α, das linke das Bild β dicht neben einander erblickt und α sich mit dem Grunde b, β mit dem Grunde a deckt, so ist die Vergleichung der objectiven oder durch Nachbilder veränderten Färbung von α und β sehr genau, so oft der Grund a dieselbe Färbung wie b hat; sie ist dagegen sehr unsicher, so oft a und b verschiedene Farbe oder Beleuchtung haben. Ersteres zerstört monoculare Simultancontraste, letzteres begünstigt sie.

Bei einigen anderen Versuchen über binocularen Contrast kommt, wie bei vielen des monocularen Contrastes, in Betracht, dass wir die objectiven Farben der Körper von der Farbe einer weit verbreiteten Beleuchtung zu trennen geübt sind.

Dahin gehört zunächst Fechner's [1] sogenannter paradoxer Versuch. Man blicke nach einer weissen Fläche, schliesse und öffne abwechselnd das rechte Auge, so wird man finden, dass im Moment des Schlusses die weisse Fläche, welche nun nur noch vom linken Auge gesehen wird, ein wenig dunkler erscheint, als während der Oeffnung beider Augen. Der Ausschluss des Lichtes von dem einen Auge bringt also, wie man erwarten musste, eine Verdunkelung des Bildes hervor, freilich eine verhältnissmässig ausserordentlich schwache, für manche Augen kaum wahrnehmbare. Nun ändere man die Bedingungen des Versuchs dadurch ab, dass man vor das rechte Auge ein ziemlich stark verdunkelndes graues Glas nimmt. Wenn man jetzt das rechte Auge öffnet, erscheint die weisse Fläche im Gegentheil dunkler; wenn man es schliesst, heller. Also wenn mehr Licht in die Augen fällt, haben wir scheinbare Verdunkelung, wenn weniger, Erhellung. Nimmt man immer hellere graue Gläser, so schwindet dieser negative Erfolg und geht endlich in den positiven über, den die freien Augen zeigen, nämlich Oeffnung des geschlossenen Auges giebt Erhellung. Geht man im Gegentheil zu sehr dunkeln Gläsern über, so kommt man zuletzt an eine Grenze, wo es einerlei bleibt, ob das Auge hinter dem Glase offen oder geschlossen ist, indem das einfallende Licht keine in Betracht kommende Wirkung mehr ausübt. Eine mittlere Verdunkelung der Gläser giebt also ein Maximum des Erfolgs. Fechner selbst brauchte dazu Gläser, die zwischen 0,03 und 0,05 des einfallenden Lichts durchliessen. Statt der grauen Gläser kann sehr zweckmässig Aubert's oben beschriebener Episkotister angewendet werden.

---

[1] Abhandl. der Sächs. Ges. d. Wiss. VII, 416—463.

Dass die Bewegung der Pupille hierbei ohne Einfluss ist, wurde controlirt, indem der Beobachter mit dem freien Auge durch eine enge Oeffnung von geringerem Durchmesser als die Pupille blickte. Man kann auch überhaupt bei diesen Versuchen enge Oeffnungen in schwarzen Papierblättern, statt der dunklen Gläser, zur Verdunkelung des Bildes anwenden.

Der Erfolg dieses paradoxen Versuchs könnte so ausgelegt werden, als wenn die Lichtempfindung in dem einen Auge unter Umständen die im anderen Auge herabsetzte, als wenn also ein antagonistisches Verhältniss zwischen beiden Netzhäuten bestände; aber eine leichte Modification des Versuchs beweist, wie ich gefunden habe, dass es sich hier um ganz etwas anderes handelt.

Man stelle sich so auf, dass man vor sich im Gesichtsfelde einen wohl begrenzten und contourirten weissen Gegenstand hat, z. B. eine weisse, den Fenstern gegenüber gelegene Thür, und wähle ein dunkles Glas, mit dem der paradoxe Versuch gut gelingt, wenn man nach dieser Thür hinblickt. Dann schiebe man zwischen die Thür und das von dem dunklen Glase bedeckte Auge nahe vor diesem ein weisses Blatt Papier so ein, dass es diesem Auge die Thür verdeckt und das ganze Gesichtsfeld dieses Auges einnimmt. Indem man das Blatt mehr oder weniger schräg gegen das Licht wendet, wird man ihm leicht eine solche Beleuchtung geben können, bei der es eben so hell ist, wie die dahinter liegende Thür. Jetzt wiederhole man den Versuch, er wird den umgekehrten Erfolg geben, wie vorher. Oeffnung des geschlossenen Auges hinter dem dunklen Glase und dem Papier lässt die Thür ganz wenig heller werden, indem sich eine Art lichten Nebels über sie ergiesst: das ist nämlich das binocular deckende Bild des weissen Papiers. Nachdem man dies constatirt hat, ziehe man nun das weisse Blatt fort, während beide Augen geöffnet sind, so dass man mit beiden Augen die Thür sieht. Jetzt erscheint die Thür beträchtlich verdunkelt, obgleich die Helligkeit jener Stellen der beiden Sehfelder, in denen sie erscheint, ganz unverändert geblieben ist [1].

Diese Aenderung des Versuchs zeigt, dass es sich hierbei nicht um eine Aenderung in der Empfindung des Lichts, sondern nur um eine Aenderung unseres Urtheils über die Körperfarbe des weissen Objects handelt. Ist das eine Gesichtsfeld ausgefüllt mit Dunkel (bei geschlossenem Auge) oder mit gleichmässig vertheiltem schwachen Lichte (Bild des weissen Papiers durch das dunkle Glas gesehen), so rechnen wir diese gleichmässig und weit über die Grenzen des der Thür entsprechenden Gesichtsfeldes ausgedehnte Beleuchtung nicht der Körperfarbe der Thür zu, sondern bilden uns unser Urtheil über diese Farbe ganz allein nach der Aussage desjenigen Auges, welches die Umrisse der Thür erkennt. Höchstens erscheinen die Abänderungen der Beleuchtung im anderen Auge als ein dunkler oder heller Nebel, der sich vor die Thür und die übrigen Gegenstände hinlegt. Wenn wir aber mit dem verdunkelten Auge ebenfalls die Umrisse der Thür erkennen und diese in dunklem Grau erblicken, so erscheint uns dieses Grau der Körperfarbe der Thür eben so angehörig, wie das

[1] Dass es bei diesem Versuch darauf ankommt, ob man begrenzte oder unbegrenzte Flächen mit dem verdunkelten Auge sieht, hat auch Herr Hering beobachtet. (Beiträge zur Physiologie. S. 311—312.)

Weiss des entgegengesetzten Auges, und die Thür selbst erscheint uns deshalb verdunkelt. Sie erscheint dann wie ein grauer, mit weissem Licht erhellter und glänzender Körper. Natürlich aber muss diese Verdunkelung ausbleiben, wenn entweder die Verdunkelung durch das Glas sehr gering ist und sich daher das im zweiten Auge hinzukommende Licht nur als Licht merklich macht, oder wenn im Gegentheil die Verdunkelung so gross ist, dass die Objecte kaum noch erkannt werden können.

Aehnliche Verhältnisse kommen auch monocular vor bei dem von Smith und Brücke [1] angegebenen Versuche, den Fechner den seitlichen Fensterversuch nennt. Man kann diesem Versuche eine andere Form geben, wie ich gefunden habe, bei der sich die Bedingungen des Erfolges noch sicherer übersehen lassen, als bei jener ersten Form. Ich habe eine planparallele Platte Uranglas in zwei Hälften theilen lassen. Dieses Glas sieht im Kerzenlicht ganz ungefärbt aus, weil es nur die violetten und einen Theil der blauen Strahlen absorbirt, deren Menge im Kerzenlicht sehr unbedeutend ist; bei Tage, wenn die Substanz des Glases selbst nicht stark erleuchtet ist, erscheinen weisse Gegenstände durch das Glas schwach gelblich. Wird die Masse des Glases selbst aber durch directes Sonnenlicht getroffen, so geht intensiv grünes Fluorescenzlicht von allen seinen Theilen aus. Wenn ich vor jedes Auge eine solche Platte Uranglas nehme, beide so beschattet, dass nur das von dem Objecte kommende Licht sie trifft, und das Bild eines weissen Feldes auf schwarzem Grunde in ein Doppelbild aus einander treibe, so erscheinen natürlich beide Bilder des weissen Feldes in gleicher gelblich weisser Farbe. Wenn ich nun aber das eine Glasstück von directen Sonnenstrahlen treffen lasse, so füllt sich das Sehfeld des dahinter stehenden Auges mit dem grünen Lichte der Fluorescenz, und nun sieht nach wenigen Bewegungen des Auges das zugehörige Doppelbild des Weiss, welches noch dazu mit grünem Lichte übergossen ist, rosaroth aus, während das Doppelbild des anderen Auges heller und grünlich erscheint, obgleich es objectiv rein weiss ist. Wir haben also hier in dem Auge, welches durch das fluorescirende Glas sieht und dessen Grund deshalb gleichmässig mit schwachem grünen Lichte bestrahlt wird, eine so vollständige Trennung des begrenzten Weiss von dem unbegrenzt ausgegossenen Grün, dass an jenem Weiss sogar die rosenrothe Färbung zum Vorschein kommt, welche durch die Ermüdung des Auges gegen Grün bedingt wird. Im Contrast dazu erscheint dann das andere nicht grüne Bild grünlich.

Bei dem ursprünglichen Versuche von Smith war es, wie wir oben gesehen haben, das rothe durch die Augenhäute eingedrungene Licht, welches das gleichseitige Bild dunkler und blaugrün, das andere roth erscheinen lässt. Dieses rothe Licht kann sichtbar gemacht werden, wenn man mit dem seitlich beleuchteten Auge schwarze Buchstaben auf weissem Grunde betrachtet; diese sehen hierbei oft leuchtend roth aus. Natürlich erscheint dann auch das dem seitlich beleuchteten Auge angehörige Halbbild eines in Doppelbilder aus einander geschobenen schwarzen Flecks auf weissem Grund röthlich in Vergleich mit

---

[1] S. oben S. 409—410.

dem des anderen Auges. Concentrirt man dagegen durch eine Linse grünes oder blaues Licht auf einen Punkt der Sclerotica, so ist das weisse Bild in diesem Auge rosenroth oder gelb. Da die Erklärung dieses Versuches bezweifelt worden ist [1], so ist die Modification desselben mit den Uranglasplatten, wobei alle concurrirenden Umstände deutlicher zu übersehen sind, wohl überzeugender.

Die Erscheinungen des binocularen Contrastes erklären sich also von dem von uns eingehaltenen Standpunkte leicht. Fasst man dagegen, wie es früher meist geschah, die Contrastfarben als Veränderungen der Empfindung auf, welche durch die Reizung einer Netzhautstelle in den benachbarten hervorgerufen werden, so folgt auch für den binocularen Contrast mit Nothwendigkeit, dass er durch Einwirkung der Empfindungen der einen Netzhaut auf die der anderen entstehe, und man hat deshalb hierin mit einen Grund für die angeborene anatomische Verbindung correspondirender Nervenfasern gesucht.

Es ist hier noch die von Dove, dem Entdecker des stereoskopischen Glanzes, aufgestellte Erklärung dieser Erscheinung zu erwähnen. Dove unterscheidet an glänzenden Körpern das von der Oberfläche reflectirte weisse und das aus den oberflächlichen Schichten der Substanz hervordringende gefärbte Licht. Glanz entsteht nach ihm dadurch, dass man die beleuchtete Körpersubstanz hinter der beleuchteten Oberfläche sehe, also zwei Arten von Licht, das eine durch das andere durchscheinend. Er glaubt nun, dass, wenn wir zwei Farben, z. B. Roth im einen, Blau im anderen Felde combiniren, wir auf verschiedene Entfernung derselben vom Auge schliessen, weil wir verschiedene Accommodation anwenden müssen, um sie scharf zu sehen. Ich habe diese Erklärung nicht beibehalten, weil die seit Aufstellung derselben angestellten Versuche über Beurtheilung der Entfernung mittels der Accommodation, namentlich in einem Falle, wo, wie hier, die Convergenz der Augen constant erhalten werden muss, es mir höchst unwahrscheinlich machen, dass eine solche Wahrnehmung scheinbar verschiedener Entfernung der Farben möglich sei. Ausserdem tritt die Schwierigkeit ein, dass Weiss und Schwarz zusammen combinirt auch Glanz geben. Hierbei glaubt Dove nun annehmen zu dürfen, dass, weil Weiss die Pupille zusammenziehen macht, was ebenfalls bei stärkerer Accommodationsanstrengung geschieht, Schwarz sie aber erweitert, die Betrachtung von Weiss und Schwarz verschiedene Accommodationsgefühle gebe. Dagegen ist zu bemerken, dass bei den vorliegenden Versuchen gleichzeitig ein Auge Weiss, das andere Schwarz sieht und beide Pupillen dabei dieselbe mittlere Weite einnehmen, zweitens, dass alle Accommodation sich nicht auf die Mitte einer gleichfarbigen Fläche, sondern nur auf ihre Contoure beziehen kann, und nicht einzusehen ist, wie daraus ein Unterschied des Accommodationsgefühls entstehen könne, dass im einen Bilde Weiss rechts, Schwarz links von der Grenze, oder Weiss über, Schwarz unter der Grenze liegt, im anderen umgekehrt. Ich habe deshalb die oben gegebene Erklärung als die einfachere der ursprünglichen des berühmten Entdeckers dieser Erscheinung zu substituiren mir erlaubt.

Geschichte. Der Wettstreit der Sehfelder erregte schon früh die Aufmerksamkeit der Beobachter. Du Tour benutzte ihn schon, um seine Meinung, dass der Regel nach nur ein Auge auf einmal sehe, und wir deshalb die Objecte einfach sähen trotz der Anwesenheit zweier Augen, zu unterstützen. Haldat wollte dagegen Mischung der Farben gesehen haben, was er mit der von Newton und später von Wollaston und J. Müller angenommenen

---

[1] Fechner über den seitlichen Fenster- und Kerzenversuch. Berichte der Kön. Sächsischen Ges. d. Wiss. 1861. S. 27—56.

Hypothese von der anatomischen Vereinigung correspondirender Sehnervenfasern in Zusammenhang brachte. Ihm schlossen sich an Mönnich, Janin, Walther. Dagegen J. Müller selbst, der die Lehre der Identität der Netzhautstellen und ihrer Consequenzen hauptsächlich ausgebildet hat und der gewiss am meisten dabei interessirt gewesen wäre, eine binoculare Farbenmischung zu sehen, keine solche erwähnt, sondern nur den Wettstreit gesehen hat. Wie auch die späteren Beobachter verschieden geurtheilt haben, ist oben schon erwähnt. Es scheinen in dieser Beziehung sehr grosse individuelle Unterschiede zu bestehen. So lange man die Empfindung einer Mischfarbe als eine einfache Wirkung zweier combinirter Ursachen ansah, schien eine solche Empfindung nur in einer und derselben Nervenfaser zu Stande kommen zu können, und die Beobachtung wirklicher binocularer Farbenmischung schien deshalb den Beweis der anatomischen Verschmelzung je zweier correspondirender Fasern liefern zu können, und musste andererseits bei Annahme einer solchen Hypothese auch nothwendig erwartet werden. Der Young'schen Farbentheorie gegenüber verliert freilich dieser Punkt sehr an Wichtigkeit, wie schon oben hervorgehoben ist.

Ein wesentlicher Fortschritt war die Entdeckung der objectiven Bedeutung der binocularen Vereinigung verschiedener Farben oder Helligkeiten in dem Phänomen des stereoskopischen Glanzes durch Dove. Der oben besprochenen Theorie dieses Phänomens, der sich auch Brewster anschloss (dabei, wie es scheint durch ein Missverständniss, Dove's eigene Theorie bekämpfend), stellte später zuerst J. J. Oppel die oben vorgetragene einfachere entgegen. Ohne von diesem zu wissen, kam ich selbst auf dieselbe Ansicht der Sache und hob die Wichtigkeit des Phänomens für die Theorie der Empfindungen correspondirender Stellen hervor.

Die Phänomene des binocularen Contrastes wurden erst in den letzten Jahren studirt, namentlich durch Fechner in einer sehr ausgedehnten Arbeit; einzelne dahin gehörige Beobachtungen waren schon früher von E. Brücke, H. Meyer, Panum gemacht worden.

1743. du Tour. *Mém. de Paris.* 1743. p. 334.
1760. Derselbe. *Pourquoi un objet sur lequel nous fixons les yeux paroit-il unique? Mém. des savans étr.* III.
1772. Janin. *Mémoires et observations sur l'oeil. Lyon et Paris.* S. 39. Deutsch: Abhandl. über das Auge und seine Krankheiten. Berlin 1776. S. 38.
1784. J. Elliot. Anfangsgründe derjenigen Theile der Naturlehre, welche mit der Arzneiwissenschaft in Verbindung stehen. Uebersetzt von Bertram. Leipzig 1784.
1791. W. C. Wells. *Essay upon single vision with two eyes.* London.
— Mönnich. Untersuchung der Frage, ob man mit beiden Augen zugleich und gleich deutlich sehe. Deutsche Abhandl. d. Berl. Akad. 1790—91. S. 46.
1793. Walther. Von der Einsaugung und Durchkreuzung der Sehnerven. Berlin 1794. Deutsche Abhandl. d. Berl. Akad. 1793. S. 3.
1799. L. A. v. Arnim. Ueber scheinbare Verdoppelung der Gegenstände für das Auge. Gilbert's Ann. III, p. 256.
1806. Ch. N. A. Haldat du Lys. *Sur la double vision. Journ. de physique.* LXIII, p. 387.
1814. Ackermann und Herholt. Sieht der Mensch mit einem Auge allein oder mit beiden zugleich. Kopenhagen.
1826. J. Müller. Beiträge zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig. S. 191—194.
1836. A. W. Volkmann. Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichts. Leipzig. S. 97—99.
1838. Wheatstone. *Contributions to the physiology of vision. Phil. Trans.* 1838. II, p. 386—387.
— Völckers in J. Müller's Archiv für Anat. u. Phys. 1838. S. 61 u. 63.
1841. Dove in Monatsber. d. Berl. Akad. 1841. S. 251.
1846. A. Seebeck. Beiträge zur Physiologie des Gehör- und Gesichtssinns. Pogg. Ann. LXVIII, 449.
1848. E. Harless. Physiologische Beobachtung und Experiment. Nürnberg. 1848. S. 45.
1849. Foucault et Regnault. *Note sur quelques phénomènes de la vision au moyen des deux yeux. C. R.* XXVIII, 78. *Phil. Mag.* XXXIV, 269. *Inst.* XVII, Nr. 783.
— de Haldat. *Optique oculaire. Nancy. — Arch. des sc. phys. et nat.* XII, 45. *Inst.* XVII, Nr. 786. p. 29.

1850. H. W. DOVE. Ueber die Ursache des Glanzes und der Irradiation, abgeleitet aus chromatischen Versuchen mit dem Stereoskop. Pogg. Ann. LXXXIII, 169. Berl. Monatsber. 1851. S. 252. *Phil. Mag.* (4) IV, 241. *Arch. d. sc. phys. et natur.* XXI, 209. *Inst.* Nr. 991. p. 421.

— Derselbe. Ueber das Binocularsehen prismatischer Farben und eine neue stereoskopische Methode. Pogg. Ann. LXXX, 446. Berl. Monatsb. 1850. S. 152. *Arch. des sc. phys. et natur.* XIX, 219.

— H. MEYER. Ueber einen optischen Versuch. Wiener Ber. VII, 454. *Arch. d. sc. phys. et natur.* XIX, 138.

1852. D. BREWSTER. *Examination of Dove's theory of lustre. Athen.* 1852. p. 1041. *Cosmos.* I, 577—578. *Silliman J.* (2) XV, 125.

— H. WELKER. Ueber Irradiation und einige andere Erscheinungen des Sehens. Giessen. S. 107.

1853. E. BRÜCKE. Ueber die Wirkung complementär gefärbter Gläser beim binoculären Sehen. Wiener Ber. XI, 213—216. Pogg. Ann. XC, 606—609.

1854. F. BURCKHARDT. Ueber Binocularsehen. Verhdl. d. naturforsch. Ges. in Basel. I, 123—154.

— J. J. OPPEL. Ueber die Entstehung des Glanzes bei zweifarbigen, insbesondere bei schwarzen und weissen stereoskopischen Bildern. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1853—54. S. 52—55, 1854—55. S. 33—37.

— F. BURCKHARDT. Zur Irradiation. Verh. d. naturf. Ges. in Basel. I, 154—157.

1855. D. BREWSTER. *On the binocular vision of surfaces of different colours. Athen.* 1855. p. 1120. *Inst.* 1855. p. 375. *Rep. of Brit. Assoc.* 1855. 2, p. 9.

— W. DOVE. Ueber die von ihm gegebene Erklärung des Glanzes. Berl. Monatsber. 1855. S. 691—694. *Inst.* 1856. p. 118—119.

1856. H. HELMHOLTZ. Ueber die Erklärung der steroskopischen Erscheinung des Glanzes. Verhandl. d. naturhist. Vereins d. Rheinlande. S. XXXVIII—XL.

— H. MEYER. Ueber den Einfluss der Aufmerksamkeit auf die Bildung des Gesichtsfeldes überhaupt und die Bildung des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes beider Augen im Besondern. Archiv für Ophthalmologie II, 2. S. 77—92.

1857. DOVE. Ueber Binocularsehen durch verschieden gefärbte Gläser. Berl. Monatsber. 1857. S. 208—211. Pogg. Ann. CI, 147—151.

— PAALZOW. Ueber subjective Farben und die Entstehung des Glanzes. Berl. Monatsber. 1857. S. 435.

1858. J. DINGLE. *On a new law of binocular vision. Athen.* 1858. II, 458.

— J. J. OPPEL. Ueber das „Glitzern", eine eigenthümliche Art des Glanzes und die stereoskopische Nachahmung desselben. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1856—57. S. 56—62.

— P. L. PANUM. Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel. S. 38—42.

1860. TH. FECHNER. Ueber einige Verhältnisse des binocularen Sehens. Berichte d. sächs. Ges. d. Wiss. VII, 337—564.

— F. ZÖLLNER. Ueber eine neue Beziehung der Retina zu den Bewegungen der Iris. Pogg. Ann. CXI, 481—499; 660.

— H. W. DOVE. Optische Notizen. Pogg. Ann. CX, 286—288.

1861. E. BRÜCKE. Ueber den Metallglanz. Wiener. Ber. XLIII, 2. p. 177—192.

— D. BREWSTER. *On binocular lustre. Athen.* 1861. (2) p. 411. *Rep. of Brit. Assoc.* 1861. 2, p. 29—31.

— O. N. ROOD. *Upon some experiments connected with* DOVE's *theory of lustre. Silliman J.* (2) XXXI, p. 339—345. *Phil. Mag.* (4) XXII, 38—45.

— H. W. DOVE. Ueber den Glanz. Berl. Monatsber. 1861. S. 522—525. Pogg. Ann. CXIV, 165—168.

— P. L. PANUM. Ueber die einheitliche Verschmelzung verschiedenartiger Netzhauteindrücke beim Sehen mit zwei Augen. Reichert's und Du Bois Archiv für Anat. u. Physiol. 63—227.

1862. W. WUNDT. Ueber die Entstehung des Glanzes. Pogg. Ann. CXVI, 627—631.

— O. N. ROOD. *On some stereoscopic experiments. Silliman J.* (2) XXXIV, 199—202.

— G. TH. FECHNER. Ueber den seitlichen Fenster- und Kerzenversuch. Leipz. Ber. 1862. S. 27—56.

— W. WUNDT. Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig und Heidelberg. S. 299—375.

1864. E. Hering. Beiträge zur Physiologie 5. Heft. Leipzig. p. 312—316.
1865. E. Javal. *De la neutralisation dans l'acte de la vision. Ann. d'oculistique.* LIV, p. 5—16.

§. 33. Kritik der Theorien.

Nachdem ich die Uebersicht der Thatsachen, die sich bei der Untersuchung der Gesichtswahrnehmungen ergeben, beendigt habe, wird es nützlich sein, noch einmal einen Rückblick auf den Zusammenhang der theoretischen Vorstellungen zu werfen und zu prüfen, welche den Thatsachen gegenüber als zulässig, welche als unzulässig oder unwahrscheinlich erscheinen.

Es ist dabei von vorn herein zu bemerken, dass unsere Kenntniss der hierher gehörigen Erscheinungen noch nicht so vollständig ist, um nur eine Theorie zu erlauben und jede andere auszuschliessen. Bei der Wahl zwischen den verschiedenen theoretischen Ansichten scheint mir unter diesen Umständen bisher mehr eine Neigung zu gewissen metaphysischen Betrachtungsweisen, als der Zwang der Thatsachen, ihren Einfluss auf die verschiedenen Forscher ausgeübt zu haben, namentlich da in dem psychologischen Gebiete noch principielle Fragen hinzukommen, die in dem Bereiche der unorganischen Naturerscheinungen längst vollständig beseitigt sind.

Manche Naturforscher sind in der Lehre von den Gesichtswahrnehmungen, wie mir scheint, allzu bereit gewesen, allerlei anatomische Structuren zu supponiren oder auch neue Qualitäten der Nervensubstanz vorauszusetzen, welche nicht die geringste Aehnlichkeit mit dem haben, was wir sonst von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Naturkörper im Allgemeinen oder den Nerven im Besonderen bestimmt wissen, Structuren und Eigenschaften, welche nur dazu dienen, für ein oder einige wenige Phänomene des Sehens Erklärungen herzustellen, die wenigstens den äusseren Anschein naturwissenschaftlicher Erklärungen haben sollten, und bei denen die ganz unzweifelhafte Einmischung psychischer Phänomene entweder ganz geleugnet oder als relativ unwichtig hingestellt wurde.

Ich gebe zu, dass wir noch weit entfernt von einem naturwissenschaftlichen Verständniss der psychischen Erscheinungen sind. Die Möglichkeit eines solchen Verständnisses entweder absolut zu leugnen, wie die Spiritualisten, oder andererseits absolut zu behaupten, wie die Materialisten, dazu kann wohl die Neigung zu dieser oder jener Richtung der Speculation treiben; dem Naturforscher, der sich an die factischen Verhältnisse zu halten und deren Gesetze zu suchen hat, ist dies eine Frage, für welche er keine Entscheidungsgründe besitzt. Man muss nicht vergessen, dass der Materialismus ebenso gut eine metaphysische Speculation oder Hypothese ist, wie der Spiritualismus, und ihm deshalb nicht das Recht einräumen, in der Naturwissenschaft über factische Verhältnisse ohne factische Grundlage entscheiden zu wollen.

Welche Ansicht man aber auch von den psychischen Thätigkeiten haben und welche Schwierigkeit ihre Erklärung auch bieten mag, so sind sie jedenfalls factisch vorhanden und ihre Gesetze sind uns bis zu einer gewissen Grenze wohlbekannt aus der täglichen Erfahrung. Ich für mein Theil halte es

für sicherer, die Erklärung der Erscheinungen des Sehens anzuknüpfen an andere, freilich selbst noch weiterer Erklärung bedürftige, aber doch jedenfalls vorhandene und thatsächlich wirksame Vorgänge, wie es die einfacheren psychischen Thätigkeiten sind, als sie auf ganz unbekannte, nur *ad hoc* erfundene, durch keinerlei Analogie gestützte Hypothesen über die Einrichtung des Nervensystems und die Eigenschaften der Nervensubstanz zu gründen. Zu dem letzteren Schritte würde ich mich erst berechtigt glauben, wenn alle Versuche der Erklärung aus bekannten Verhältnissen gescheitert sein sollten.

Das letztere ist nun meines Erachtens aber bei der psychologischen Erklärung der Gesichtswahrnehmungen keineswegs der Fall; im Gegentheil je aufmerksamer ich die Erscheinungen studirt habe, desto gleichmässiger und übereinstimmender hat sich überall die Einwirkung der psychischen Vorgänge gezeigt, und desto consequenter und zusammenhängender stellte sich mir dieses ganze Gebiet von Erscheinungen dar.

Ich habe deshalb keinen Anstand genommen, in den vorausgehenden Paragraphen die Thatsachen durch Erklärungen, die wesentlich auf die einfacheren psychischen Vorgänge der Ideenassociation gestützt sind, in Verbindung und in Zusammenhang zu setzen. Dass eine solche Ansicht nicht neu ist, habe ich in den geschichtlichen Uebersichten schon erwähnt. Wenn in der jüngsten Zeit die Ansichten einzelner Physiker und Physiologen, die diese Richtung einschlugen, wie Wheatstone, Volkmann, H. Meyer, Nagel, Classen, Wundt, mehr Opposition als Anerkennung fanden, so glaube ich, dass dies, abgesehen von der Abneigung unseres Zeitalters gegen philosophische und psychologische Untersuchungen, davon herrührt, dass es an einer zusammenhängenden Darstellung aller Erscheinungen dieses Gebiets fehlte, und deshalb von Seiten der unerledigten Erscheinungsgebiete immer wieder Zweifel aufstiegen gegen diejenigen, welche von den genannten Forschern bearbeitet waren. Ich habe deshalb die vorliegende Gelegenheit benutzt, um das ganze Gebiet nach dieser Richtung hin durchzuarbeiten und eine Uebersicht davon zu geben.

Ich erlaube mir einen kurzen Ueberblick der zur Erklärung von mir benutzten Principien zu geben. Der Hauptsatz der empiristischen Ansicht ist: Die Sinnesempfindungen sind für unser Bewusstsein Zeichen, deren Bedeutung verstehen zu lernen unserem Verstande überlassen ist. Was die durch den Gesichtssinn erhaltenen Zeichen betrifft, so sind sie verschieden nach Intensität und Qualität, das heisst nach Helligkeit und Farbe, und ausserdem muss noch eine Verschiedenheit derselben bestehen, welche abhängig ist von der Stelle der gereizten Netzhaut, ein sogenanntes Localzeichen. Die Localzeichen der Empfindungen des rechten Auges sind durchgängig von denen des linken verschieden.

Wir fühlen ausserdem den Grad der Innervation, die wir den Augenmuskelnerven zufliessen lassen. Die Anschauung der Raumverhältnisse und der Bewegung sind nicht nothwendig aus den Gesichtswahrnehmungen, oder wenigstens nicht aus diesen allein, herzuleiten, da sie bei Blindgeborenen ganz genau und vollständig auch unter Vermittelung des Tastsinnes gewonnen werden, sie können also für unseren Zweck als gegeben vorausgesetzt werden.

Durch Erfahrung können wir offenbar lernen, welche anderen Empfindungen des Gesichts oder der anderen Sinne ein Object, welches wir sehen, uns machen wird, wenn wir die Augen oder unsern Körper fortbewegen und jenes Object von verschiedenen Seiten betrachten, betasten u. s. w. Der Inbegriff aller dieser möglichen Empfindungen in eine Gesammtvorstellung zusammengefasst, ist unsere Vorstellung von dem Körper, welche wir Wahrnehmung nennen, so lange sie durch gegenwärtige Empfindungen unterstützt ist, Erinnerungsbild, wenn sie das nicht ist. In gewissem Sinne also, obgleich dem gewöhnlichen Sprachgebrauche widersprechend, ist auch eine solche Vorstellung von einem individuellen Objecte schon ein Begriff, weil sie alle die möglichen einzelnen Empfindungsaggregate umfasst, welche dieses Object, von verschiedenen Seiten betrachtet, berührt oder sonst untersucht, in uns hervorrufen kann. Das ist der thatsächliche und reelle Inhalt einer solchen Vorstellung von einem bestimmten Objecte; einen anderen hat sie nicht, und dieser Inhalt kann ohne Zweifel unter Voraussetzung der oben genannten Data durch Erfahrung gewonnen werden.

Die einzige psychische Thätigkeit, die dazu gefordert wird, ist die gesetzmässig wiederkehrende Association zweier Vorstellungen, die schon oft mit einander verbunden gewesen sind, welche Association desto fester und zwingender wird, je öfter die Wiederholung stattgefunden hat.

So weit also unsere durch Gesichtsbilder vermittelten Vorstellungen von den Objecten richtig sind, erklären sie sich einfach aus den vorangestellten Principien. Es fragt sich nun aber, wie ist es möglich, dass Sinnestäuschungen vorkommen. Unter diesen müssen wir zwei Klassen unterscheiden. Erstens solche, bei denen die äusseren Umstände, unter denen die Einwirkung auf unsere Sinne geschieht, ungewöhnliche sind, wie bei der Betrachtung der optischen Bilder von Spiegeln, Linsen oder bei der Combination stereoskopischer Darstellungen. Hier wird der Eindruck, den bestimmte Objecte machen, unter ungewöhnlichen Bedingungen erzeugt. Obgleich wir dies wissen, ruft der Eindruck nach dem Gesetze der Vorstellungsassociationen doch die Vorstellung der der Regel nach mit ihm verbunden gewesenen anderen Sinneseindrücke, das heisst die Vorstellung des betreffenden Objects hervor.

Die zweite Klasse von Sinnestäuschungen ist diejenige, wobei wir wirkliche Objecte bei ungewöhnlichem Gebrauche unserer Sinnesorgane falsch sehen. Zu ihrer Erklärung ist zu beachten, dass, sobald eine bestimmte Art des Gebrauchs unserer Sinneswerkzeuge geeignet ist, uns deutlichere und sicherere Wahrnehmungen der Objecte zu geben, als jede andere, wir jene, die wir deshalb die normale genannt haben, möglichst viel oder ausschliesslich anzuwenden uns einüben. Brauchen wir dann unsere Sinnesorgane in abweichender Weise, so rufen die gewonnenen Eindrücke uns naturgemäss die Vorstellungen solcher Objecte hervor, welche beim normalen Gebrauche der Organe dieselben oder möglichst ähnliche Eindrücke gegeben haben würden.

Beim normalen Gebrauche der Augen kommt in Betracht, erstens, dass in jedem Auge die Centralgrube der Netzhaut die deutlichste Unterscheidung nahe neben einander gelegener Bilder zulässt, zweitens, dass wir deutliche

Eindrücke nur behalten, wenn wir durch fortwährende Augenbewegungen die Ausbildung scharf gezeichneter Nachbilder vermeiden, drittens, dass wir an einer ausgedehnten Fläche von gleichmässiger Beleuchtung alles deutlich gesehen haben, was an ihr deutlich zu sehen ist, wenn wir alle Theile ihres Umfangs deutlich gesehen haben. Daraus ergiebt sich, dass wir beim normalen Gebrauche der Augen beide Blicklinien auf den Punkt richten, der gerade unsere Aufmerksamkeit in Anspruch nimmt, und die Augen für ihn accommodiren, dieselben aber niemals längere Zeit unbewegt lassen, was auch dem eigenthümlichen Bewegungstriebe unserer Aufmerksamkeit nicht entsprechen würde, vielmehr den Blick namentlich an den Contouren der gesehenen Objecte entlang laufen lassen.

Daraus folgt die gewohnheitsmässige Verbindung der Bewegungen beider Augen miteinander und mit der Accommodation; eine Gewohnheit, gegen die so schwer anzukämpfen ist und die doch jeden Augenblick durch willkührliche Anstrengung überwunden werden kann, wie oben gezeigt wurde, wenn man die Augen allmälig unter Bedingungen bringt, wo nur mittels ungewöhnlicher Verbindungen die Zwecke des Sehens erreicht werden können. Daraus folgt ferner die Schwierigkeit, den Blick längere Zeit gegen die eingeübte Gewohnheit auf einem Punkte festzuhalten, daraus der grosse Einfluss hervortretender Contoure auf unsere Aufmerksamkeit und auf die Bewegung unseres Blicks; daraus auch weiter, dass unsere Aufmerksamkeit so schwer zu einer genaueren Analyse der Erscheinungen des indirecten Sehens, des blinden Flecks, der Doppelbilder und so weiter, festzuhalten ist, indem wir gewohnheitsmässig sogleich unseren Blick auf die die Aufmerksamkeit beschäftigenden Stellen hinzuwenden streben. Daher wir denn auch hauptsächlich wegen der gewohnheitsmässig eintretenden Augenbewegungen selbst die stärker auseinander weichenden Doppelbilder der vor uns befindlichen Gegenstände nicht zu sehen pflegen und sie eben desshalb vielen, selbst erwachsenen Leuten unbekannt bleiben.

Dass die Verbindung zwischen der Raddrehung jedes einzelnen Auges und der Richtung der Gesichtslinie unter dieselbe Kategorie fällt, dass sie unter abgeänderten Bedingungen des Sehens zu Gunsten der optischen Zwecke selbst abgeändert werden kann, habe ich oben gezeigt und versucht die Sicherheit der Orientirung, vermöge deren wir die unveränderte Lage ruhender Gegenstände trotz der Verschiebungen ihres Bildes auf der Netzhaut erkennen, als denjenigen Zweck nachzuweisen, der durch die Erfüllung des Listing'schen Gesetzes für unsere Augenbewegungen so weit als möglich erreicht wird.

Da nachweisbar zu Gunsten von optischen Zwecken von allen diesen Gesetzen der Augenbewegungen Ausnahmen unter dem Einflusse willkührlicher Anstrengung eintreten können, so können diese Gesetze nicht auf mechanisch wirkende anatomische Einrichtungen begründet sein; andererseits halte ich es nicht für unmöglich, sondern sogar für wahrscheinlich, dass das Wachsthum der Muskeln und vielleicht selbst die Leitungsfähigkeit der Nervenbahnen sich den Forderungen, die an sie gemacht werden, im Laufe jedes individuellen Lebens und vielleicht selbst durch Vererbung im Laufe des Lebens der Gattung so anpasst, dass die geforderten zweckmässigsten Bewegungen auch die

leichtesten werden. Jedenfalls ist dieser anatomische Mechanismus, so weit ein solcher besteht, nur erleichternd, nicht zwingend.

Mittels der Augenbewegungen ist es ferner möglich die Ordnung der gesehenen Punkte im Gesichtsfelde kennen zu lernen, das heisst, zu lernen, welche Localzeichen der Empfindungen den einander unmittelbar benachbarten Punkten entsprechen. Das specielle Gesetz der Augenbewegungen bestimmt dann weiter, welche Raumgrössen des Gesichtsfeldes ihrer Grösse nach genau mit einander verglichen werden können, welche nicht. Genau verglichen werden diejenigen, deren Bild durch blosse Bewegung des Auges auf denselben Punkten oder Linien der Netzhaut abgebildet werden kann; eine Regel, welche durch die Thatsachen durchaus bestätigt wird. Dagegen finden sich bei der Vergleichung solcher Raumgrössen, die nicht auf denselben Netzhauttheilen abgebildet werden können, theils constante, theils inconstante Fehler. Die constanten Fehler lassen sich zum Theil darauf zurückführen, dass wir (wenigstens als Kinder, während der Ausbildung unseres Auges) als häufigstes Gesichtsobject entferntere Gegenstände und den bis zu ihnen hin sich erstreckenden Fussboden vor Augen haben. Ich erinnere an die Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane und an die falsche Zeichnung der Quadrate.

Endlich zeigt sich der Einfluss des Gesetzes der Augenbewegungen auch in der Führung der scheinbar geraden (oder kürzesten) Linien des Gesichtsfeldes. Verlegen wir die Blicklinie in ihre Primärlage, welche wir als ihre häufigste und wichtigste Stellung betrachten dürfen, so sind es diejenigen Linien, die nach dem Gesetze der Augenbewegungen sich in sich selbst verschieben können.

Ich habe die Ableitung dieser Gesetze auf gar keine bestimmte Annahme über die Art der Localzeichen begründet. Sie würde passen, auch wenn diese Zeichen ganz willkührlich über die Netzhaut ausgewürfelt wären, ohne dass irgend welche Aehnlichkeit der Localzeichen benachbarter Punkte vorausgesetzt würde. Es würde dadurch allerdings die Schwierigkeit der Einübung beträchtlich erhöht werden. Ich halte es dagegen nicht für unwahrscheinlich und der Analogie anderer organischer Einrichtungen gemäss, dass die Localzeichen benachbarter Punkte einander ähnlicher seien, als die entfernter Punkte, und dass somit die Art des Localzeichens eine continuirliche Function der Coordinaten der Netzhautpunkte sei. Indessen wie auch dieses System der Localzeichen, von welcher Art sie selbst sein mögen, so kann ihre besondere Einrichtung die Orientirung wohl erleichtern; aber auch hier fordern die Consequenzen der empiristischen Theorie, mit denen die Erscheinungen durchaus übereinstimmen, dass jede solche Einrichtung nur erleichternd für die Einübung des Augenmaasses, nicht entscheidend für seine definitiven Resultate sei.

Zu diesen anatomischen Einrichtungen gehört dann auch die Zahl der empfindlichen Elemente zwischen je zwei Netzhautpunkten. Diese mag namentlich bei der Unterscheidung sehr kleiner Distanzen nicht unwichtig sein, nach dem Gesetze, dass deutlich unterscheidbare Grössen beim Mangel anderer Hilfsmittel der Beurtheilung uns grösser erscheinen, als undeutlich unterscheidbare. Dass die Anzahl der empfindlichen Elemente bei der Schätzung der grösseren Distanzen ohne allen Einfluss sei, ist oben gezeigt worden.

Für die empiristische Theorie ist es übrigens ganz gleichgültig, wie die Netzhaut gestaltet ist, wie das Bild auf ihr liegt und wie es verzerrt ist, wenn es nur scharf begrenzt ist; sie hat es nur und allein zu thun mit der Projection der Netzhaut, welche die optischen Medien nach aussen entwerfen.

Die Richtung, in der die gesehenen Objecte sich zu unserem Körper befinden, wird beurtheilt mit Hilfe der Innervationsgefühle der Augenmuskelnerven, aber fortdauernd controllirt nach dem Erfolge, das heisst nach der Verschiebung der Bilder, welche die Innervationen hervorbringen. Sehen wir durch Prismen und nehmen wir dabei Bewegungen mit unserem Körper und unseren im Gesichtsfelde erscheinenden Händen vor, so lernen wir bald, trotz der falschen Richtung der einfallenden Strahlen durch das Prisma richtig sehen. Die Erscheinungen des Bewegungsschwindels zeigen ebenso eine Veränderung in der Beurtheilung der Wirkung gewisser Innervationen an.

Wir beurtheilen den absoluten Grad der Convergenz unsicherer, als die gleich gerichteten Bewegungen beider Augen, vielleicht weil für die Convergenz eine anhaltendere Ermüdung zu Stande kommen kann, welcher nicht durch Ermüdung für Divergenz das Gleichgewicht gehalten wird, während eine längere Wendung der Augen nach rechts nicht leicht ohne dazwischenfallende Wendungen nach links vorkommen möchte, wobei die Ermüdung sich gleichmässiger auf die antagonistischen Muskeln vertheilt.

Theils deshalb, theils aber auch, weil wir consequent die subjectiven Momente in unseren Sinnesempfindungen unbeachtet lassen und also bei Fixirung eines nahen Gegenstandes die ganze Summe von Gesichtseindrücken und Innervationsgefühlen nur als das sinnliche Zeichen für ein dort gelegenes Object betrachten, ohne zu analysiren, welche Eindrücke dem rechten oder linken Auge angehören, welche Stellung dieses oder jenes hat, beurtheilen wir die Richtung der Objecte gegen unseren Körper nach der gemeinsamen mittleren Richtung beider Augen, auch wenn wir nur mit einem Auge das Object wirklich sehen. Es entspricht dies der Regel, dass wir bei Eindrücken, die wir unter ungewöhnlicher Art des Gebrauches der Organe (einäugigem Sehen) erhalten, nach der Aehnlichkeit mit den Eindrücken bei normalem Gebrauch (doppeläugigem Sehen) urtheilen; daher die von J. Towne und E. Hering aufgefundene Regel für die Projection der Gesichtsbilder nach aussen, mit den Modificationen, die ich für die Raddrehungen bei schrägen Blickrichtungen habe anbringen müssen.

Wir kommen jetzt zum doppeläugigen Sehen. So lange wir im objectiven Gebiete verweilen, beim Sehen von Körpern oder von stereoskopischen Bildern, sind die Erscheinungen einfach zu erklären und leicht verständlich nach der empiristischen Theorie; auch ist der Einfluss der Erfahrung in diesem Gebiete meistens selbst von den Anhängern nativistischer Theorien, mit Ausnahme einiger der neusten Arbeiten, anerkannt worden. Die Täuschungen, welche hier vorkommen, erklären sich aus der Unsicherheit der Schätzung der Convergenz. Wenn wir den Augen Bilder zeigen, welche von reellen Objecten nur bei einem bestimmten Grade der Convergenz gegeben sein könnten, so geben wir ihnen die entsprechende Deutung, auch wenn zur Zeit wirklich ein anderer Grad von Convergenz besteht. Dazu kommt, dass wir wegen der mangelnden Sicherheit

des Convergenzgefühls, auch keine Sicherheit in der Beurtheilung der Differenzen der Raddrehungen haben, welche die convergenten Augen bei gehobener und gesenkter Blickebene zeigen. Wenn daher die Abweichungen in den Linien der gesehenen Bilder uns nicht aufmerksam machen, dass Drehung vorhanden sei, so urtheilen wir so, als ob keine da wäre, und es treten dann die von Recklinghausen und von Hering beschriebenen Täuschungen ein.

Wenn nun aber bei festgehaltenem Fixationspunkte die Aufmerksamkeit der flächenhaften Anordnung der Gegenstände im Gesichtsfelde zugelenkt wird, so sieht jedes Auge eine andere Anordnung derselben und die beiden Bilder können nicht ganz congruiren; wenn also einzelne Punkte derselben congruiren, so müssen andere Punkte der Bilder disparat sein und diese erscheinen dann an zwei verschiedenen Stellen des gemeinschaftlichen Sehfeldes, als Doppelbilder. Punkte der Netzhäute, beziehlich Punkte der beiden Sehfelder, deren Bilder im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde zusammenfallen, hat man identische oder correspondirende Punkte genannt.

In Bezug auf die Natur der correspondirenden Punkte ergeben nun die Thatsachen mit Entschiedenheit so viel:

1. Die Bilder correspondirender Punkte werden in der Regel in dieselbe, die Bilder nicht correspondirender Punkte in verschiedene Stellen des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes verlegt; doch kommen kleinere Abweichungen von beiden Theilen dieser Regel vor, wenn wir die beiden Bilder zur Anschauung eines körperlichen Objects vereinigen.

2. Die Empfindungen, welche durch die Erregung correspondirender Netzhautpunkte hervorgebracht werden, sind nicht identisch, sondern verschieden. Wir müssen dies nothwendig schliessen aus der Thatsache, dass wir auch beim Lichte des elektrischen Funkens von einer stereoskopischen Linienzeichnung immer das richtige Relief erhalten. Wären die Empfindungen correspondirender Punkte ununterscheidbar gleich, so müsste ebenso oft und ebenso leicht das umgekehrte Relief erscheinen [1]. Wir schliessen dasselbe zweitens daraus, dass verschiedene Beleuchtung oder Färbung entsprechender Flächen in zwei stereoskopischen Bildern eine andere Anschauung, nämlich die des Glanzes, hervorbringt als jede, wie immer gewählte, gleichartige Färbung beider Flächen. Dass hierbei Augenbewegungen und der Wettstreit der beiden Sehfelder keinen Einfluss haben, zeigt sich namentlich bei der Beleuchtung auch dieser Bilder mit dem elektrischen Funken.

3. Unter dem Einfluss habitueller abnormer Augenstellungen bei Schielenden ändert sich das Verhältniss der Correspondenz der beiden Netzhäute.

Hieraus schliesse ich, dass jede anatomische Hypothese unzulässig ist und unvereinbar mit den Thatsachen, welche eine vollständige Verschmelzung der beiderseitigen Empfindungen voraussetzt, also namentlich jede, welche eine Vereinigung der von correspondirenden Netzhautstellen kommenden Fasern zu

---

[1] Donders giebt an (*Anomalies of accommodation and refraction.* London 1864. p. 162 und 166), dass bei unbewegtem Auge oft das pseudoskopische Bild statt des stereoskopischen erscheine. In einer eben erschienenen Abhandlung im Nederlandsch Archief (1866), wo er ähnliche Vorsichtsmassregeln angewendet hat, wie oben S. 740 angegeben sind, hat er aber im Wesentlichen dieselben Resultate, wie Aubert und ich erhalten.

einer Faser annimmt, die den beiderseitigen Eindruck ungetrennt dem Gehirne zuleiten soll. Nur eine solche Form der anatomischen Hypothese würde mir zulässig erscheinen, wonach beide Eindrücke theils gesondert, theils aber auch mit einer gemeinsamen oder gleichen Wirkung im Gehirn zur Perception kommen; also etwa so, dass die Faser A von dem rechten Auge sich spaltet in die Fasern a und α, die correspondirende Faser B in die Fasern b und β, dass a und b gesondert in das Centralorgan des Sehens eintreten und verschiedene Eindrücke hervorbringen, α und β aber sich vereinigen, um einen beiden gemeinsamen dritten Eindruck zu machen.

Eine so modificirte Annahme würde mir zulässig, aber weder wahrscheinlich noch nothwendig erscheinen. Vielmehr ergeben die Consequenzen der bisher aufgestellten Erklärungen auch hier eine, wie mir scheint, vollständig genügende Erklärung ohne eine solche Annahme. Beim normalen Sehen sind immer die Blicklinien auf denselben objectiven Punkt gerichtet, dem gleichzeitig auch die Aufmerksamkeit zugewendet ist; auf allen anderen Punkten der Netzhäute dagegen kommen bald gleiche, bald ungleiche Eindrücke vor; daher wird vor allen Dingen die Localisation der Eindrücke der Netzhautgruben eine übereinstimmende. Ist es dagegen wegen einer Erkrankung der Muskeln nicht möglich die dazu gehörige Stellung der Augen herbeizuführen, und wird dafür eine andere Stellung habituell, so bestimmt diese auch, mit welchem Punkte der anderen Netzhaut die Netzhautgrube jedes Auges correspondent wird.

Die Identität der Meridiane bestimmt sich danach, wo sich am häufigsten Reihen derselben Punkte abbilden. Dies geschieht zunächst in der Primärstellung der Blickebene, die wir als mittlere und gewöhnlichste Stellung dieser Ebene betrachten dürfen, auf den Netzhauthorizonten. Demnächst scheinen bei vielen normalsichtigen Augen die nach dem Horizont hinlaufenden Linien des Fussbodens einen bestimmenden Einfluss auf die Lage der verticalen correspondirenden Meridiane auszuüben.

Sind diese beiden Paare correspondirender Meridiane bestimmt, so bestimmen sich die übrigen Abmessungen der Sehfelder und damit die Lage der congruirenden Punkte in beiden vollständig nach dem oben beschriebenen Verfahren mittels der Augenbewegungen.

Da hiernach die Vergleichung der Dimensionen beider Sehfelder und die Lage der congruenten Punkte in ihnen ein Ergebniss der Ausbildung des Augenmaasses ist, so sind kleine Irrungen in diesen Abmessungen möglich, wenn sich mit grosser Lebhaftigkeit die Anschauung körperlicher Einheit der beiden Bilder aufdrängt. Sind die Entfernungen der Doppelbilder von einander dagegen sehr auffallend, so kann eine annähernd richtige Deutung derselben mit der Wahrnehmung ihrer Trennung im Gesichtsfelde zusammen bestehen. Alles, was die Vereinigung der Doppelbilder zum körperlichen Anschauungsbilde erschwert oder die Vergleichung ihrer Lage im Gesichtsfelde erleichtert, Vermeidung aller Augenbewegungen und Uebung in ihrer Beobachtung macht sie leichter sichtbar. Je nach der Richtung der Aufmerksamkeit kann man solche, die an der Grenze der Wahrnehmbarkeit liegen, auch beim Lichte des elektrischen Funkens, welches allen Einfluss der Augenbewegungen aufhebt, bald sehen, bald nicht sehen.

Alles dies sind Umstände, die mit der aufgestellten Erklärung sehr gut zusammenstimmen und aus ihr hergeleitet werden können.

Die Erscheinungen des Wettstreits endlich hängen von der Eigenthümlichkeit unseres Bewusstseins ab, dass es entweder nur einen Eindruck auf ein Mal, oder nur ein solches Aggregat von Eindrücken aufnehmen kann, die sich zu einer einfachen Vorstellung verbinden. Abgesehen von den bekannten täglichen Erfahrungen zeigt sich diese Eigenthümlichkeit desselben sehr deutlich bei der bekannten Zeitdifferenz zwischen den Gesichts- und Gehörwahrnehmungen in der astronomischen Beobachtung der Sterndurchgänge, ferner in der kleinen Zahl von Gesichtsobjecten, die man beim Lichte des elektrischen Funkens und während der kurzen Nachdauer seines Eindrucks wahrnehmen kann. Die Form der Vereinigung der Eindrücke beider Sehfelder ist die Anschauung körperlicher Objecte. Wo diese wegen der Art der beiden Bilder misslingt, tritt das im Wettstreit der Sehfelder sich zeigende Schwanken der Aufmerksamkeit ein, wenn diese nicht durch scharfgezeichnete Contoure des einen Feldes gefesselt ist. Ich habe oben die Methoden beschrieben, nach denen es gelingt die Aufmerksamkeit auf eines der Felder zu fesseln und dem Schwanken ein Ende zu machen. Dadurch besonders kann auch der Nachweis geführt werden, dass dieser Wettstreit nur ein Phänomen der Aufmerksamkeit ist.

Aus dieser Uebersicht der aufgestellten Erklärungen geht hervor, dass dabei von den psychischen Vorgängen nur die unwillkührlich erfolgenden der Ideenassociation und des unwillkührlichen Flusses der Vorstellungen in Betracht kommen, welche nicht unter der directen Herrschaft unseres Selbstbewusstseins und unseres Willens stehen, wenn wir auch dadurch, dass wir selbstbewusste Vorstellungen und Zwecke mit jenen in Concurrenz bringen, einen gewissen Einfluss auf deren Lauf haben können. Eben darin liegt es nun, dass die Ergebnisse jenes Ablaufs der Vorstellungen uns entgegentreten als durch eine Macht gegeben, die wir nicht oder nur zum kleinen Theile beherrschen können, und die unserem Willen und Selbstbewusstsein daher als eine fremde, objective Naturmacht entgegentritt, gerade wie die unmittelbar von aussen gegebenen sinnlichen Empfindungen. Was also von Resultaten psychischer Vorgänge dieser Art sich mit den Sinnesempfindungen verbindet, erscheint uns ebenso durch äusseren Einfluss gegeben wie die unmittelbare Empfindung, und nicht durch selbstbewusste und freie Ueberlegung gefunden, nicht von uns erdacht. In dieser Beziehung hat die empiristische Ansicht vielfältiges Missverständniss von Anhängern sowohl, als von Gegnern erfahren, und ich mache deshalb auf diesen Punkt noch besonders aufmerksam. Will man diese Vorgänge der Association und des natürlichen Flusses der Vorstellungen nicht zu den Seelenthätigkeiten rechnen, sondern sie der Nervensubstanz zuschreiben, so will ich um den Namen nicht streiten. Hier würde die empiristische Theorie mit derjenigen Form der nativistischen, wie sie Panum zum Beispiel aufgestellt hat, sich vielleicht vereinigen lassen, nur dass er als natürlich gegeben ansieht, was mir nur durch die Erfahrung gewonnen zu sein scheint.

Was nun die verschiedenen nativistischen Theorien betrifft, so ist ihr Kernpunkt, dass sie die Localisation der Eindrücke im Gesichtsfelde von

einer angeborenen Einrichtung ableiten, entweder so, dass die Seele eine directe Kenntniss der Ausdehnungen der Netzhaut haben soll, oder so, dass in Folge der Reizung bestimmter Nervenfasern gewisse Raumvorstellungen vermittels eines angeborenen, nicht weiter definirbaren Mechanismus entstehen. J. Müller namentlich hat diese Ansicht in der ersten Form durchgeführt. Er sagt [1]: „Der Begriff des Raumes kann nicht erzogen werden, vielmehr ist die Anschauung des Raumes und der Zeit eine nothwendige Voraussetzung, selbst Anschauungsform für alle Empfindungen. Sobald empfunden wird, wird auch in jenen Anschauungsformen empfunden. Was aber den erfüllten Raum betrifft, so empfinden wir überall nichts, als nur uns selbst räumlich, wenn lediglich von Empfindung, von Sinn die Rede ist; und so viel unterscheiden wir von einem objectiven erfüllten Raum durch das Urtheil, als Raumtheile unserer selbst im Zustande der Affection sind, mit dem begleitenden Bewusstsein der äusseren Ursache der Sinneserregung. Die Netzhaut sieht in jedem Sehfelde nur sich selbst in ihrer räumlichen Ausdehnung im Zustande der Affection; sie empfindet sich selbst in der grössten Ruhe und Abgeschlossenheit des Auges räumlich dunkel."

Diese Ansicht erweitert daher die von Kant aufgestellte Ansicht, dass Raum und Zeit ursprünglich gegebene Formen unserer Anschauungen seien, dahin, dass auch die specielle Localisation jedes Eindrucks durch die unmittelbare Anschauung gegeben sei. Die meisten deutschen Physiologen folgten dieser Ansicht von Müller, und es wurden von ihnen mancherlei Erklärungen der Gesichtserscheinungen auf die besonderen Eigenthümlichkeiten der Form der Netzhautbilder gebaut. So hat Recklinghausen [2] die Abweichung der scheinbar rechten Winkel dadurch zu erklären versucht, dass die Fläche der Netzhaut schief gegen die Gesichtslinie des Auges gerichtet sei und deshalb die optischen Bilder eines rechten Winkels in dem Netzhautbilde schiefwinklig werden könnten. Diese Beschaffenheit der Netzhautbilder sollte dann unmittelbar wahrgenommen werden können. E. Hering [3] und A. Kundt [4] haben sogar angenommen, die Seele schaute die Entfernungen zwischen zwei Netzhautpunkten direct nicht nach dem Bogen auf der Netzhaut, sondern nach der Sehne an, und versuchten daraus die Erklärung der oben beschriebenen Täuschungen der monocularen Localisation im Gesichtsfelde herzuleiten. Dass diese Hypothese zur Erklärung derjenigen Erscheinungen, zu deren Gunsten sie allein erfunden ist, keineswegs genügt, ist oben schon angeführt worden.

Die besprochene Annahme der nativistischen Theorien ist eigentlich eine Verzichtleistung auf jede Erklärung der Localisationsphänomene. Darüber lässt sich natürlich nicht weiter rechten, und namentlich kann es J. Müller in keiner Weise zum Tadel gereichen, dass er zu einer Zeit, wo noch alle Beobachtungen über das Gesetz der Augenbewegungen fehlten, und aus einem Versuche, diese für die Erklärung der Localisation zu gebrauchen, nichts als ganz vage Folgerungen gezogen werden konnten, in seinen Erklärungsversuchen nicht weiter zu

---

[1] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. S. 54 ff.
[2] Netzhautfunctionen im Archiv für Ophthalmologie. V, 2, S. 128—141.
[3] Beiträge zur Physiologie. Heft 1, S. 65—80.
[4] Poggendorff's Annalen. 1863. CXX, 118—158.

gehen geneigt war. Dass dagegen aus dem Gesetze der Augenbewegungen, soweit wir es bisher in seinen Grundzügen kennen, sich auch die Grundzüge des Augenmaasses herleiten lassen, die in der nativistischen Ansicht gar keine weitere Erklärung finden, habe ich oben zu zeigen mich bemüht.

Eine nothwendige Consequenz der erwähnten Ansicht, dass die Localisation der Eindrücke im Gesichtsfelde ursprünglich gegeben sei, ist dann die, dass auch ursprünglich gegeben sein muss, welche Punkte der einen Netzhaut mit denen der anderen dieselbe Localisation geben, also correspondirend, oder, wie die nativistische Ansicht es bezeichnet hat, identisch sind. Hier in der Lehre von der angeborenen und anatomisch begründeten Identität, welche also als eine nothwendige Consequenz der nativistischen Ansicht betrachtet werden muss, treten nun aber die schon oben bezeichneten wesentlichen Schwierigkeiten dieser Ansicht auf; daher dieses Gebiet auch immer der Haupttummelplatz der Streitigkeiten gewesen ist.

Erstens nämlich konnten die Beobachtungen der körperlich ausgedehnten Objecte schon lehren, und zeigte namentlich die Erfindung des Stereoskops durch Wheatstone, dass wir keineswegs immer Doppelbilder sehen, wo nach der strengen Identitätstheorie dergleichen zu erwarten sind, und dass dieselben unter dem Einflusse der Anschauung körperlicher Ausdehnung verschwinden. Nun wurde zwar von Brücke mit Recht der grosse Einfluss der Augenbewegungen hierbei hervorgehoben; indessen auch wenn man diesen Einfluss eliminirt, bleibt doch immer die Thatsache bestehen, dass auch der geübteste Beobachter gewisse einander nahe stehende ähnliche Doppelbilder mit einander untrennbar verschmiltzt, während er einander eben so nahe stehende ähnliche Bilder im monocularen Felde, oder in der Färbung verschiedene Bilder im binocularen Felde mit der grössten Leichtigkeit von einander unterscheidet. Noch grösseren Anstoss haben die Anhänger der Identitätstheorie an der von Wheatstone behaupteten Thatsache genommen, dass unter Umständen auch die Eindrücke identischer Netzhautpunkte getrennt und an zwei verschiedene neben einander liegende Stellen des Objects verlegt werden könnten. Dass das letztere aber eine nothwendige Consequenz des ersteren sei und bei richtig angestellten Versuchen auch thatsächlich beobachtet werde, habe ich oben ausgeführt. Man muss nur nicht, wie es von den Gegnern der Behauptung Wheatstone's immer geschehen ist, verlangen, dass bei der Trennung identischer Eindrücke viel mehr geleistet werde, als bei der Vereinigung disparater Eindrücke unter gleichen Umständen geleistet werden kann.

Das wesentliche Gewicht der Thatsachen anerkennend, stellte Panum eine Modification der Identitätstheorie auf, wonach jeder Punkt a der einen Netzhaut einem gewissen correspondirenden Empfindungskreise A in der andern identisch sein sollte, so dass das Bild des Punktes a verschmelzen könnte mit einem Bilde auf jedem einzelnen Punkte von A, welches ähnliche Contouren darböte. Dabei sollte aber eine verschiedene Tiefenwahrnehmung entstehen, wenn a mit verschiedenen Punkten des Kreises A verschmölze. Ob es mit diesem oder jenem verschmölze, sollte davon abhängen, wo sich im Empfindungskreise A eine Contour vorfände, die der durch a hinziehenden ähnlich sei. Aus den

Wettstreitserscheinungen beweist Panum die dominirende Macht der Contoure im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde beider Augen, wobei er freilich wohl den Sieg der Contoure als zu unbedingt und dauernd betrachtet hat. Wettstreit findet nach ihm hauptsächlich zwischen unähnlichen, aber nahe gleich starken Farben und Contouren statt. Aehnliche streben zu verschmelzen.

Wenn man die von Panum aufgestellten Sätze blos als zusammenfassenden Ausdruck der Thatsachen ansehen will, was er selbst auch als das Wesentlichere und Wichtigere betont, so sind sie der Hauptsache nach richtig. Ich würde gegen seine Darstellung der Thatsachen nur einzuwenden haben, 1. dass ich mich von der wirklichen Existenz binoculärer Mischfarben auch in den von ihm beschriebenen Versuchen nicht habe überzeugen können, 2. dass Herr Panum keine genügenden Methoden die Aufmerksamkeit zu fesseln, angewendet und daher die grosse Rolle, welche die Aufmerksamkeit bei dem Wettstreite der Sehfelder und bei der Unterscheidung der Doppelbilder spielt, nicht genügend erkannt hat. 3. Dass er die Augenbewegungen beim Fixiren der Bilder für theilweis unwillkührliche Reflexbewegungen hält, während ich selbst bei mir wohl eine Neigung zu gewissen gewohnheitsmässigen Stellungen anerkennen kann, die aber nicht im geringsten die Willkühr der Bewegung beeinflusst, wenn ich eine andere Stellung der Blickpunkte hervorzubringen wünsche. 4. Dass bei der Verschmelzung der Doppelbilder doch nicht blos die Aehnlichkeit der Contoure und der Grad der Annäherung an eine correspondirende Lagerung entscheidet, sondern auch die Anwesenheit oder Abwesenheit anderer Vergleichungspunkte für die richtige Abmessung der scheinbaren Lage beider Contoure im gemeinsamen Gesichtsfelde. Das Letztere hatten schon Bergmann's [1] Versuche gezeigt, und in ähnlicher Weise zeigt es der oben S. 742 beschriebene Versuch an *Fig. U*, selbst wenn man von Volkmann's Versuchen absehen wollte, gegen welche Panum den Einwand erhoben hat, dass in ihnen kleine, wenn auch unbedeutende Veränderungen der Contoure durch zugesetzte Linien und Punkte angebracht sind, die an der Stelle das Verschmelzen hindern. Aber wie Bergmann's und meine Versuche zeigen, hindern auch correspondirend gelegene Linien, welche beide auf der gleichen Seite von zwei disparaten liegen und die Aehnlichkeit von deren Contouren gar nicht beeinträchtigen, das Verschmelzen derselben, welches ohne die Anwesenheit jener correspondirenden Linien eintreten würde.

Die von Herrn Panum aufgestellten Erklärungen sind nun nach den Verwahrungen und Erläuterungen derselben, die er in seiner zweiten Arbeit [2] dazu gegeben hat, kaum etwas mehr, als dass jede Klasse von Beobachtungen zu einem besonderen Vermögen der Nervenapparate erhoben wird. So schreibt er den beiden Augen oder ihren Nervenapparaten eine binoculare Energie der Farbenmischung zu, vermöge deren sich binocular gesehene Farben zur Mischfarbe vereinigen können. Daneben giebt es aber auch eine andere binoculare Synergie des Alternirens, vermöge deren binocular gesehene Farben sich auch nicht vereinigen, sondern in Wettstreit gerathen können. Die

---

[1] Göttinger gelehrte Anzeigen, 1859. S. 1055—1063.
[2] Reichert und du Bois-Reymond Archiv für Anat. und Physiol. 1861. S. 63—111.

letztere soll überwiegen, wenn die beiderseitig einwirkenden Erregungen sehr intensiv, oder die Erregbarkeit des Sehorganes sehr gross ist. Disparate Bilder können vereinigt werden mittels einer dritten binocularen Synergie des Einfachsehens durch correspondirende Empfindungskreise. Die Tiefenwahrnehmung endlich kommt zu Stande mittels einer vierten specifischen Synergie der binocularen Parallaxe.

Die Contoure der Figuren werden als besonders starke Nervenreize betrachtet und die Augenstellungen im Wesentlichen als unwillkührlich eintretende Reflexbewegungen, und auch in Bezug auf die genannten Synergien betont es Herr Panum besonders, dass sie als physiologische, nicht als psychische Kräfte zu betrachten seien.

Ich muss gestehen, dass ich nicht klar verstanden habe, in welcher Weise Herr Panum sich denkt, dass neben der Verschmelzung disparater Punkte in correspondirenden Empfindungskreisen doch der Hauptsatz der Identitätslehre, wonach die Eindrücke identischer Stellen verschmelzen müssen, noch bestehen könne, auf welchen wirklichen oder anscheinenden Widerspruch Herr Volkmann aufmerksam gemacht hatte. Herr Panum erklärt, seine Sätze behaupteten, dass die Eindrücke, welche correspondirenden Empfindungskreisen angehören, verschmelzen könnten, die aber auf identischen Stellen verschmelzen müssten. Daraus würde aber doch immer folgen, dass, so oft der Eindruck a einer Netzhaut mit dem einer disparaten Stelle β verschmilzt, nothwendig auch a mit dem der identischen Stelle α der zweiten Netzhaut, folglich auch α und β, zwei Stellen desselben Bildes mit einander verschmelzen müssen, wenn nicht eines von ihnen ausgelöscht wird, was jedenfalls in vielen Fällen, wie in den oben beschriebenen Versuchen, nicht der Fall ist. In Figuren wie *M* und *N* *Taf. VIII* sind beide identisch liegende, aber nicht verschmelzende Linien durch Contoure hervorgehoben; keine von ihnen verschwindet durch Wettstreit mit der andern, sonst könnte keine stereoskopische Tiefenwahrnehmung durch ihre Vereinigung mit einer disparaten Linie des andern Bildes auch in der Beleuchtung durch den elektrischen Funken zu Stande kommen. Ebenso müssen zwischen zwei verschmelzenden disparaten Grenzlinien verschieden gefärbter Flächen immer gewisse identische Punkte existiren, für welche der Wettstreit der durch die benachbarten Contoure hervorgetriebenen Farben im Gleichgewicht ist und die also beide gesehen und dabei an verschiedene Punkte des angeschauten körperlichen Objects verlegt werden. Uebrigens ist dieser Streitpunkt, so viel ich einsehe, unerheblich für die Theorie; ich muss ihn ausserdem nach dem Ergebniss meiner eignen Beobachtungen zu Gunsten von Wheatstone's Behauptung als erledigt betrachten. Wenn man auch die Nothwendigkeit der Verschmelzung der Eindrücke auf identischen Stellen fallen lässt, so behalten dieselben doch immer die factische Bedeutung, dass ähnliche Eindrücke beider Netzhäute desto leichter verschmelzen, je näher sie an identische Stellen treffen. Das scheint mir auch die einzig richtige Beschreibung des Identitätsverhältnisses zu sein, was man übrigens auch als seinen Grund betrachten möge, und dadurch dass Herr Panum dieses Verhältniss durch bezeichnende Ausdrücke scharf hervorgehoben hat, hat er einen wesentlichen Fortschritt in der Lehre vom binocularen

Sehen bewirkt, den ich gern anerkenne; auch würde ich gewiss der Letzte sein, der gegen seine Scheu und Vorsicht in der theoretischen Verallgemeinerung der beobachteten Thatsachen Einspruch erhöbe, und würde seine theoretischen Versuche, die er selbst als Nebensache zu betrachten auffordert, hier nicht kritisirt haben, wenn ich nicht überhaupt die möglichen Erklärungsformen des vorliegenden Gebiets zu besprechen genöthigt wäre, und wenn nicht ein Theil von PANUM's theoretischen Ansichten auch die Grundlage der unten zu besprechenden neueren Theorie von E. HERING bildete.

Der Leser wird aus der gegebenen Uebersicht entnehmen, dass die Erklärungen, welche Herr PANUM giebt, wenigstens so weit sie sich auf die Verschmelzung und den Wettstreit der Bilder beziehen, in der That nur der Form nach Erklärungen sind, indem die Thatsachen in einem abstracten Begriff zusammengefasst werden, und nur in der Verwahrung gegen die Einmischung psychischer Vorgänge, welche sich aber überall auf unvollständige Beobachtung der Thatsachen stützt, beziehen sie sich wenigstens negativ auf das ursächliche Verhältniss. Uebrigens werden in ihnen der Nervensubstanz Formen der Thätigkeit beigelegt, die wir wohl aus dem Gebiete der niederen Seelenthätigkeiten kennen, aber denen Aehnliches im Gebiete der Körperwelt noch niemals aufgefunden ist.

In deutlicherer und fester ausgebildeter Gestalt kehren uns die Grundzüge der Theorie von PANUM in der von E. HERING aufgestellten Theorie des binocularen Sehens entgegen. Diese Theorie ist überhaupt unter den bis jetzt aufgestellten wohl die consequenteste Form, welche die nativistische Theorie erhalten hat, und verdient deshalb eine eingehendere Besprechung. Ein bedeutender Fortschritt der HERING'schen Theorie liegt darin, dass sie von einer richtigeren Kenntniss der scheinbaren Sehrichtung der angeschauten Objecte ausgeht, wodurch wesentliche Schwierigkeiten der früheren Theorien beseitigt werden.

Herr HERING nimmt an, dass die einzelnen Netzhautpunkte im erregten Zustande ausser den Farbenempfindungen noch dreierlei verschiedene Arten von Raumgefühlen hervorrufen. Ein erstes entspricht dem Höhenwerth der betreffenden Netzhautstelle, das zweite dem Breitenwerth. Die Höhengefühle und Breitengefühle, welche zusammen das Richtungsgefühl für den Ort im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde ergeben, sind für correspondirende Netzhautpunkte gleich. Ausserdem existirt ein drittes Raumgefühl besonderer Art, ein Tiefengefühl, welches in je zwei identischen Netzhautpunkten gleiche, aber entgegengesetzte Werthe, dagegen auf symmetrisch gleich gelegenen gleiche und gleichsinnige Werthe haben soll. Das Tiefengefühl der äusseren Netzhauthälften ist positiv, das heisst entspricht grösserer Tiefe, das der inneren Netzhauthälften negativ, das heisst: entspricht grösserer Annäherung.

Durch diese Annahme ist zunächst das oben schon von mir bezeichnete nothwendige Erforderniss einer mit den Thatsachen vereinbaren Identitätstheorie erfüllt, die Eindrücke correspondirender Netzhautstellen sind zwar theilweise gleich, nämlich betreffs ihres Richtungsgefühls, theilweise aber verschieden, nämlich durch ihr Tiefengefühl. Bis hierher würde ich die Annahmen von

Hering sogar für die von mir vertretene empiristische Theorie zwar nicht nothwendig, aber vortheilhaft finden, eine solche Annahme würde die Erklärung der Einübung des Augenmaasses in der Erziehung des Gesichtsinns wesentlich erleichtern. Nur wären dabei die „Raumgefühle“ als Localzeichen zu betrachten, deren räumliche Bedeutung erst durch Erfahrung zu lernen wäre. Gleiche Zeichen aber für das bezeichnete Gleiche zu haben, würde offenbar vortheilhaft sein.

Nur in einer Beziehung macht die Abweichung der scheinbar verticalen und identischen Meridiane eine Abweichung von den Hering'schen Annahmen nöthig für diejenigen Augen, die damit behaftet sind, nach den Versuchen die ich selbst und Herr Dastich angestellt haben. Die Höhen- und Breitenwerthe nämlich würden bei uns ebenfalls für identische Stellen gleich zu nehmen sein, aber die positiven und negativen Tiefenwerthe würden nicht durch die correspondirenden scheinbar verticalen Meridiane, sondern durch die wirklich verticalen Meridiane zu scheiden sein. Wir sehen nämlich bei symmetrischer Augenstellung, wie ich schon oben bemerkt habe, eine Linie, die auf den beiden wirklich verticalen, aber nicht identischen Meridianen abgebildet ist, senkrecht zur Visirebene, dagegen eine solche, die auf den beiden scheinbar verticalen identischen Meridianen abgebildet ist, gegen den Beobachter geneigt, mit ihrem oberen Ende entfernter als mit dem untern. So viel ich sehe, hat diese Abweichung weiter keinen Einfluss auf die ferneren Consequenzen der Theorie.

Nun stossen wir freilich auch bei Hering wieder auf das Mysterium der Identitätslehre: Auf Deckpunkte (d. h. correspondirende Punkte) fallende gleiche oder verschiedene Lichtreize lösen stets nur eine einfache Lichtempfindung aus. Sie müssen also nothwendig vereinigt werden, wie an vielen Stellen des Buches betont wird, während andererseits doch auch disparate Bilder correspondirender Empfindungskreise vereinigt werden können. Auch bei Hering scheint mir dieser Satz mehr eine Folge einer polemischen Stimmung gegen vielleicht zu eingreifende Gegner der Identitätstheorie zu sein, als ein nothwendiges Erforderniss der Theorie. Er könnte, so viel ich sehe, ohne Schaden für den Zusammenhang beseitigt werden, indem man dafür setzte, dass Bilder von ähnlichen Contouren und ähnlicher Färbung desto leichter verschmelzen, je näher sie identischen Stellen kommen.

Für dieses Einfachsehen mit disparaten Netzhautstellen nimmt nun Herr Hering nicht wie Herr Panum einen organischen Grund an, sondern einen psychischen, indem er sich darauf stützt, dass zur Trennung zusammengesetzter Empfindungen Uebung und eine gewisse Schulung der Aufmerksamkeit nothwendig sei, ein Satz, der durchaus richtig ist und eine viel grössere Zahl von den anscheinenden Widersprüchen in den Erscheinungen dieses Gebietes zu erklären im Stande ist, als Herr Hering daraus erklärt. Namentlich tritt für seine Theorie hier folgende Schwierigkeit ein. Wenn a und α correspondirende Netzhautstellen sind, b eine dem a benachbarte in demselben Auge wie a, und gleiche Bilder auf b und α entworfen werden, so verschmelzen sie nach Herrn Hering's Meinung, weil sie in Qualität gleich, im Richtungsgefühl sehr ähnlich und nur in Tiefengefühlen erheblich verschieden sind, und weil wir uns nicht die Zeit nehmen, diese Bilder getrennt zu betrachten, sondern, wenn wir auf sie

aufmerksam werden, zur Fixation beider forteilen — was seiner Meinung zufolge freilich durch eine Art von Reflexbewegung geschehen soll —, und sie dann einfach sehen. Nun frage ich, warum unterscheiden wir denn aber so sehr viel eher und leichter, wenn zwei gleichartige Bilder auf die Netzhautstellen a und b fallen. Diese sind dann nämlich nicht blos qualitativ gleich und haben in den Richtungsgefühlen denselben kleinen Unterschied, wie b und α, sondern sie haben auch einen ebenso kleinen Unterschied im Tiefengefühl, während b und α in diesem einen sehr grossen Unterschied darbieten. Aus Herrn Hering's Darstellung würde also folgen, dass die Empfindungen a und b noch sehr viel leichter verschmelzen müssten, als die von α und b, was aber der Erfahrung geradezu widerspricht. Herr Hering kann nun darauf antworten, dass wenn wir a oder b zu fixiren suchen, nur eins fixirt werden kann, und dass wir daher gelernt haben a und b zu unterscheiden, nicht aber α und b. Damit würde er aber ganz auf dem Standpunkte der empiristischen Theorie angekommen sein, wonach wir die Empfindungen der Localzeichen zu unterscheiden und zu deuten lernen müssen.

Und gerade diese Gelegenheit, wo Herr Hering selbst gezwungen ist, in der psychischen Theorie Lösung der Schwierigkeiten zu suchen, die seine Ansicht hervorruft, benutzt er um gegen Volkmann's und Anderer psychologische Erklärungen zu polemisiren. Volkmann's Fehler, wenn man es so nennen will, ist dabei aber im Wesentlichen nur der, dass er die psychischen Processe, auf die es hier ankommt, mit denjenigen Benennungen belegt hat, die wir ihnen geben, wenn sie in das Selbstbewusstsein erhoben werden. Zum Theil haben wir gar keine anderen bezeichnenden Benennungen als diese, weil wir Vorgänge nur benennen können, sofern wir von ihnen wissen. Wenn also diejenigen Vorgänge dieser Art, von denen wir nur aus ihren Resultaten wissen, als unbewusste Seelenvorgänge bezeichnet werden, so hat dies seinen guten Sinn und ist eben die einzige Bezeichnung, die wir dafür haben, wenn wir nicht bei jeder Gelegenheit weitläuftige Umschreibungen machen wollen.

Bei der binocularen Verschmelzung zweier Eindrücke erhält nun nach Hering die Gesammtempfindung den mittleren Werth des Richtungsgefühls sowohl als des Tiefengefühls. Da die Tiefengefühle identischer Stellen gleich gross sind, aber von entgegengesetztem Zeichen, so wird der Mittelwerth des Tiefengefühls bei Verschmelzung identischer Eindrücke gleich Null. Bei gleichseitigen Doppelbildern fällt, wie leicht zu sehen ist, der Mittelwerth des Tiefengefühls positiv aus, das Object erscheint entfernter, bei ungleichseitigen Doppelbildern ist der Mittelwerth negativ, das Object erscheint näher, als die identisch abgebildeten Objecte.

Wenn jeder Netzhauteindruck sich nothwendig mit dem der correspondirenden Stelle der andern Netzhaut stets in gleicher Stärke vereinigen müsste, so würde der mittlere Tiefenwerth dieser Vereinigung immer gleich Null sein. Nur dadurch dass im Wettstreite der Eindruck desjenigen Sehfeldes, welches die Contour trägt, die Empfindung des andern unterdrückt, wird der Tiefenwerth der Contour frei und kann mit seinem eigenthümlichen Werthe in die Vereinigung

mit der entsprechenden Contour im andern Sehfelde eintreten. Auch dieser Erklärung widersprechen die oben gegebenen Modificationen des Wheatstone'schen Versuches, bei denen unähnliche Contouren, die sich nicht vereinigen, auf Deckstellen liegen und selbst beim Lichte des elektrischen Funkens sich jede von beiden im stereoskopischen Bilde mit ihrem Tiefenwerthe geltend macht, zum Zeichen, dass keine von ihnen im Wettstreite untergeht.

Auf diese Annahme baut nun Herr Hering seine Raumconstruction. Er nimmt an, alle Bildpunkte, die den Tiefenwerth Null haben, erscheinen durch einen unmittelbaren Act der Empfindung in einer Ebene, der Kernfläche des Sehraums. Denken wir uns in dieser den Punkt, welcher den beiden Netzhautcentren entspricht, als Anfangspunkt eines rechtwinkeligen Coordinatensystems, die den Tiefenwerthen entsprechenden Coordinaten senkrecht zur Kernfläche, so würden die drei Coordinaten jedes gesehenen Punktes proportional sein den Höhenwerthen, Breitenwerthen, Tiefenwerthen des zu dem binocularen Eindrucke gehörigen Raumgefühls, und es wäre nach Hering in dieser Weise eine Vertheilung der gesehenen Punkte im Sehraum gegeben, die wenigstens in der Anordnungsweise der Punkte der wirklichen Anordnung derselben entspräche, wenn auch die Verhältnisse der einzelnen linearen Distanzen nun noch vielfach nach der Erfahrung zu corrigiren wären. Da auch die Körpertheile des Beobachters mit in diesem so ausgefüllten Sehraume erscheinen, so wird dadurch auch die räumliche Beziehung der gesehenen Objecte zum Beobachter zugleich mit zur Anschauuung gebracht.

Das sind die wesentlichen Grundzüge der Theorie von Hering. Die älteren nativistischen Theorien des Sehens hatten nur die Vertheilung der gesehenen Punkte im Gesichtsfelde für angeboren, die Wahrnehmung der Tiefendimensionen dagegen für einen Act des Urtheils gehalten. Panum hatte zuerst die Hypothese aufgestellt, aber nicht in bestimmterer Form ausgeführt, dass die binoculare Parallaxe eine unmittelbare Empfindung der Tiefenverhältnisse geben könnte. Dies hat Herr Hering in der beschriebenen Weise bestimmter auszuführen gesucht und dadurch der nativistischen Theorie ein noch weiteres Feld eingeräumt, als ihr bisher gegeben war. Das von ihm aufgestellte System verräth einen klar und consequent denkenden Kopf, es berücksichtigt die bisher bekannt gewesenen Thatsachen vollständig und auch einige wichtige neue, die Herr Hering selbst hinzugefügt hat, und kann deshalb, wie ich glaube, als ein gutes Specimen dieser Klasse von Theorien angesehen werden, weshalb ich mir erlaube, meine Kritik speciell gegen die Theorie von Herrn Hering zu richten.

Der erste Einwand, den ich zu machen hätte und der mir für mein Denken allerdings als ganz unübersteiglich erscheint, ist der, dass ich mir nicht vorstellen kann, wie eine einzelne Nervenerregung ohne vorausgegangene Erfahrung eine fertige Raumvorstellung zu Stande bringen kann. Ich erkenne aber an, dass dieser Einwand vielleicht von zu metaphysischer Natur ist, um auf naturwissenschaftlichem Boden gehört zu werden, und merke ihn deshalb hier nur an für diejenigen Leser, die ihn mit mir theilen. Ich wende mich deshalb sogleich zu den Gegengründen, die dem Bereiche der erfahrungsmässigen Thatsachen entnommen sind.

Dass die Annahmen der Panum-Hering'schen Theorie von der Verschmelzung der beiden Gesichtsfelder den Thatsachen widersprechen, habe ich schon oben erwähnt. Der Annahme, dass die beiderseitigen Eindrücke in eine Empfindung verschmelzen müssen, wobei nur abwechselnd in langsamer Schwankung bald der eine, bald der andere vorherrschen könne, wird widerlegt durch die Möglichkeit, stereoskopischen Glanz wahrzunehmen bei momentaner Beleuchtung. Die Annahme, dass in den Fällen, wo disparate Contoure verschmelzen, die identisch zu ihnen gehörigen Bilder der anderen Netzhaut unterdrückt seien, wird widerlegt durch das Gelingen des Wheatstone'schen Versuchs, wenn er richtig ausgeführt wird, und namentlich durch sein Gelingen bei momentaner Beleuchtung, wobei die Augenbewegungen keinen Einfluss haben können.

Eine weitere Fundamentalhypothese der Hering'schen Theorie ist es, dass die Punkte, welche auf identischen Netzhautstellen sich abbilden (oder allgemeiner, die den Tiefenwerth Null haben), immer in einer Ebene zu liegen scheinen sollen, dass das Vortreten oder Zurücktreten der binocular gesehenen Objectpunkte vor oder hinter diese Ebene (Kernfläche des Sehraums) nur davon abhängen solle, ob sie positive oder negative stereoskopische Parallaxe haben. Ich habe oben auf Seite 656 ff. eine Reihe von Versuchen beschrieben, aus denen hervorgeht, dass auch wenn alle anderweitigen Anhaltspunkte der Tiefenanschauung fehlen, einfache Liniensysteme, welche genau dieselbe binoculare Parallaxe darbieten, stereoskopisch combinirt, bald als gewölbte, bald als ebene Fläche erscheinen können, je nachdem durch die Querlinien mehr Aehnlichkeit mit den binocularen Bildern eines nahen und mit convergenten Blickliniën gesehenen Objects oder denen eines mit parallelen Gesichtslinien gesehenen fernen Objects entsteht.

Ich habe ferner gezeigt, dass wenn ein System von verticalen Fäden, die in der Cylinderfläche des Längshoropters liegen, Herrn Hering in einer Ebene zu liegen scheint, was, wie er andeutet, selbst für seine Augen nicht streng richtig ist, dies eine individuelle Eigenthümlichkeit seiner Augen ist, die bei keinem der von mir untersuchten Individuen, auch bei mir selbst nicht vorkam, und dass bei den meisten Beobachtern der Irrthum in der Beurtheilung der Convergenz der Augen, der dieser Erscheinung zu Grunde zu liegen scheint, viel kleiner ist, als dass der von Herrn Hering behauptete Erfolg zu Stande kommen könnte.

Eine Hauptschwierigkeit oder, wie mir scheint, Unmöglichkeit der Hering'schen Theorie sind die Tiefengefühle. So lange Eindrücke der einen Netzhaut mit correspondirenden oder disparaten der andern Netzhaut sich vereinigen, wo es sich nur um die Differenz der Tiefengefühle beider Stellen handelt, tritt, so viel ich sehe, keine wesentliche Schwierigkeit ein, ausser den eben angeführten. Wenn aber das Bild einer Netzhaut, ohne zu verschmelzen, für sich stehen bleibt und im Wettstreite mit dem der andern Netzhaut dominirt, so nimmt Herr Hering an, und muss auch nothwendig annehmen, dass das Tiefengefühl des im Wettstreite siegenden Eindrucks ebenfalls unverschmolzen mit dem der correspondirenden Deckstelle der andern Netzhaut zur Herrschaft kommt.

Herr Hering [1] glaubt auch einige Versuche anführen zu können, in denen

[1] Beiträge zur Physiologie. 5. Heft. S. 338—342.

solche monoculare Bilder mit dem ihnen allein zugehörigen Tiefeneindruck zur Erscheinung kämen.

a. Wenn man einen Punkt in der Medianebene fixirt und ein zweiter liegt vor oder hinter dem Fixationspunkte, so erscheint dieser in Doppelbildern, die ebenfalls vor oder hinter dem Fixationspunkte nahe dem wahren Orte ihres Objects erscheinen. Diese Beobachtung widerspricht der Hering'schen Theorie nicht, beweist aber auch nichts für sie, da wir eben hinreichende Uebung haben, den Ort eines in nicht zu entfernten, aber erkennbaren Doppelbildern gesehenen Objects nahehin richtig zu beurtheilen. Dass hier die Erfahrung und nicht die Tiefengefühle entscheiden, geht aus den weiteren Versuchen hervor, wo beide in Widerspruch kommen und wo die Erfahrung, wie mir scheint, immer oder wenigstens, wie Herr Hering zugiebt, in der Regel siegt.

b. Zwei Kügelchen werden neben einander an Fäden aufgehängt, die Sehlinien hinter ihnen gekreuzt, so dass drei Kugeln erscheinen, eine mittlere binocular gesehene, zwei seitliche monocular, die rechte vom linken, die linke vom rechten Auge gesehen. Nach Hering sollen die seitlichen Kügelchen näher als das mittlere erscheinen. Ich habe den Versuch wiederholt und finde seinen Erfolg abhängig von der Kopfhaltung. Ist mein Kopf bei der Fixation der Kügelchen hinten übergebeugt, die Visirebene also unter ihre Primärlage geneigt, so erscheint mir der binocular gesehene mittlere Faden mit dem unteren Ende, welches das Kügelchen trägt, genähert, wie oben S. 661 schon erörtert ist, und dann auch das mittlere Kügelchen näher als die seitlichen. Ist der Kopf vorn übergebeugt, so tritt der entgegengesetzte Anschein ein, der dann freilich dem von Hering's Theorie geforderten dem Sinne nach entspricht, aber offenbar einen ganz anderen Grund hat. Biegt man den Kopf bald nach vorn, bald nach hinten, so wechselt auch das Kügelchen seine Stellung.

c. Wenn man einen Stecknadelknopf fixirt, und daneben ist ein senkrechter Draht angebracht etwas nach links und etwas näher als die Stecknadel, so erscheint dieser in Doppelbildern, deren rechtes dem linken Auge angehört und einen negativen Tiefenwerth haben sollte, das linke gehört dem rechten Auge an und sollte einen positiven Tiefenwerth haben. Das rechte müsste also viel näher, das linke viel ferner als die Stecknadel erscheinen. Herr Hering giebt zu, dass eine solche Tiefenanschauung nur ausserordentlich schwer und flüchtig gesehen werde, weil, wie er meint, die kleinste Schwankung der Convergenz das Urtheil über den Ort des Objectes berichtige. Um ihm aber nicht Unrecht zu thun, will ich lieber den Erfolg dieses Versuches mit seinen eigenen Worten beschreiben: „Ich sehe zunächst und überhaupt immer dann, wenn meine Augen sich irgendwie, wenn auch nur sehr wenig bewegen, die beiden Trugbilder des näheren Drahtes zwar gesondert, aber beide näher als die fixirte einfach erscheinende Stecknadel. Fixire ich aber anhaltend und fest und concentrire meine ganze Aufmerksamkeit möglichst auf die fixirte Stecknadel, so tritt das eine, dem linken Auge angehörige Trugbild plötzlich hinter die Stecknadel und erscheint mit solcher Energie jenseits derselben, dass ich diesen Eindruck durchaus dem zwingenden Eindrucke vergleichen muss, mit welchem Stereoskopenbilder sich plötzlich in die Tiefe ausbreiten. Die Erscheinung tritt gerade

dann am sichersten ein, wenn ich am wenigsten daran denke. Die geringste Schwankung des Blickes aber, oder nur der Gedanke an das zweite näher erscheinende Trugbild versetzt das andere sogleich wieder vor die Kernfläche; denn es tritt dann die Beziehung beider Bilder auf ein und dasselbe Object ein und stört den rein sinnlichen Eindruck. Aber auch ganz von selbst schwindet die Erscheinung, sobald das Trugbild infolge der Ruhe des Auges in eine ungünstige Phase des Wettstreits eintritt, wie dies oben erörtert wurde. Daher denn mancherlei sich vereinigt, um den Versuch zu stören. Ueberhaupt kann ich ihn nur denjenigen empfehlen, die grosse Uebung im indirecten Sehen haben und wirklich fest fixiren können, nicht blos es zu können glauben. Man lernt das feinste Doppelsehen nicht in einem Jahre, auch nicht in zweien".

Einige Seiten vorher bemerkt Herr Hering hierher gehörig noch, indem er die Störungen der Empfindung bei diesen Versuchen beschreibt: „Hierzu kommt nun noch, dass bei irgend ausgedehnten Trugbildern der Wettstreit nicht immer in allen Theilen des Trugbildes gleiche Phasen zeigt, dass vielmehr das Trugbild stückweise Sieger und Besiegter im Wettstreite ist, wodurch eine sichere und feste Localisation ganz unmöglich wird. Drängen sich auf diese Weise Stücke des auf der betreffenden Deckstelle der andern Netzhaut liegenden Bildes mit ihren entgegengesetzten Tiefenwerthen in das Trugbild derart hinein, dass sie gleichsam Bestandtheile desselben werden, so kann die Localisation sogar entgegengesetzt der *a priori* zu erwartenden ausfallen".

Diesem letzteren Theile der Beschreibung entspricht nun vollkommen das, was ich selbst bei einer möglichst sorgfältigen und gewissenhaften Anstellung des Versuchs gesehen habe. Ich habe so fest und so lange die Stecknadel fixirt, dass mir schliesslich die negativen Nachbilder alles auslöschten. Ich habe gesehen, dass zu der Zeit, wo nur noch einzelne Theile der Doppelbilder des Drathes im Wettstreit mit dem correspondirenden Grunde und mit den Nachbildern zeitweilig nebelhaft auftauchen, sie bald fern, bald nah erscheinen, das eine ebenso oft und ebenso energisch, wie das andere; aber ich habe mich nicht überzeugen können, dass dies überwiegend in dem Sinne der Hering'schen Theorie geschieht, und würde es nie unternommen haben, aus einer an solchen halb erlöschenden Bildern gemachten Beobachtung das Fundament für eine neue Theorie des Sehens zu machen. Indessen gebe ich zu, dass ich ungeschickt gewesen sein mag; nur wird Herr Hering entschuldigen müssen, wenn ich durch diesen ihm selber so „zwingenden Beweis für die Richtigkeit der Theorie" mich nicht für überzeugt erklären kann.

d. Panum's Versuche über die stereoskopische Vereinigung zweier senkrechter Linien im einen Felde mit einer im andern finden leicht ihre Erklärung, wie oben Seite 733 schon bemerkt ist. Ein solches Bild ist der richtige optische Ausdruck eines Linienpaares im Raume, von denen eine für das eine Auge die andere deckt.

e. Wenn man nur ein Auge öffnet und mit dem anderen allein irgend eine zur Antlitzfläche senkrechte Ebene betrachtet, so müsste die schläfenwärts gekehrte Seite derselben positive Tiefenwerthe haben, die nasenwärts gekehrte

negative, die Ebene sollte deshalb stark gegen die Gesichtslinie geneigt erscheinen. Dass sie es nicht thut, erklärt Herr HERING dadurch, dass wir der Erfahrung zulieb, die uns lehrt, wie die gesehene Ebene gegen unseren Körper liegt, die Kernfläche des Sehraums in unserer Anschauung eine Achtelswendung machen lassen, wodurch die richtige Lage der gesehenen Fläche wieder hergestellt werde.

Wir können den Versuch aber so modificiren, dass diese Ausflucht abgeschnitten ist. Man nehme vor die Mitte des Gesichts einen schwarzen Papierstreifen, dessen Breite der Distanz der Augen von einander gleichkommt. Dann sieht das rechte Auge nur die rechte Hälfte der vorliegenden Objecte, das linke nur die linke Hälfte. Das ganze Gesichtsfeld bis auf einen kleinen im Zerstreuungskreise der beiden Ränder des Papierstreifens liegenden mittleren Streifen wird monocular gesehen. Ein nennenswerther Wettstreit zwischen dem Schwarz des Papiers und den hellen Bildern des Zimmers tritt bei hin und wieder wechselnder Richtung des Blicks nicht ein; keinerlei Augenbewegungen sind im Stande, das Urtheil über die wahre Entfernung der gesehenen Objecte zu unterstützen. Eine Achtelswendung der Kernfläche würde in diesem Falle die Schwierigkeit ebenfalls nicht heben. Alle Bedingungen also bei diesem Versuche scheinen mir dazu angethan, die von Herrn HERING supponirten Tiefengefühle rein zu Erscheinung kommen zu lassen, und man sollte erwarten nun die beiden Theile der Wand an der Stelle, wo die Grenze der beiden Sehfelder liegt, sich unter einem ziemlich kleinen spitzen Winkel (der HERING'schen Theorie zufolge müsste dieser Winkel dem Convergenzwinkel der Augen gleich sein) zusammenstossen zu sehen, wie eine Messerschneide die gegen den Beobachter gekehrt ist. Davon ist aber keine Spur zu sehen, die Wand erscheint ganz flach, gerade so, wie sie mit beiden Augen gesehen erscheint.

Die andern Täuschungen aber, die von der Abweichung der scheinbar verticalen Meridiane, der etwa vorhandenen Raddrehungsdifferenz beider Augen und so weiter abhängen, sind bei diesem Versuche alle deutlich zu sehen. Soll nun die Erfahrung, dass die Wand eben ist, die eine täuschende Empfindung beseitigen? Warum beseitigt dann die andere Erfahrung, dass die horizontalen Linien der Wand alle gerade, ihre verticalen alle parallel sind, welche ich noch bis zu dem Augenblick, wo ich den Papierschirm vorschiebe, machen und fortsetzen kann, nicht auch die von der Raddrehung und der Abweichung der Meridiane abhängigen Täuschungen?

Auch selbst in Fällen, wo die Contoure der gesehenen Bilder vollkommen denen eines objectiven Gegenstandes entsprechen, und also die Tiefengefühle mit den mittels der Augenbewegungen zu machenden Beobachtungen sich in vollkommener Uebereinstimmung befinden, wie bei den pseudoskopischen Versuchen, kommen Tiefenwahrnehmungen nicht zu Stande, wenn die Schlagschatten widersprechen; und der Zusammenhang der Körperform mit dem Schlagschatten ist doch gewiss ein Erfahrungsmoment. Und selbst, wenn die Schlagschatten nicht widersprechen, sondern nur die Erinnerung an die vorher gesehene wahre Form des pseudoskopisch betrachteten Körpers, sind viele Leute, die auf die binoculare Parallaxe vielleicht wenig zu achten gewöhnt sind, gar nicht, manche

erst nach längerer Betrachtung bei wechselnder Blickrichtung im Stande, den pseudoskopischen Eindruck zu erhalten.

Aus allen diesen Thatsachen folgt, dass die Hering'schen Tiefengefühle nur wirken, wenn auch die durch die Erfahrung gegebenen Momente eine Tiefenwahrnehmung fordern, dass sie spurlos verschwinden, sobald die erfahrungsmässige Auslegung der Gesichtserscheinungen, oder auch nur die Erinnerung an die Form des individuellen Objects widerspricht. Muss man daraus nicht schliessen, dass jene Tiefengefühle, wenn sie überhaupt existiren, mindestens so schwach und undeutlich sind, dass sie gar keinen nennenswerthen Einfluss den aus der Erfahrung genommenen Momenten gegenüber ausüben können, und dass daher die Tiefenanschauung ohne sie ganz eben so gut zu Stande kommen muss als mit ihnen, beziehlich wider sie, wie es nach Hering's Annahmen geschehen soll?

Schliesslich führt uns dies auf eine letzte wesentliche Schwierigkeit, der noch keine nativistische Theorie der Raumanschauung entgangen ist, wenn sie sich nicht ganz auf allgemeine Andeutungen beschränkte. Es muss nämlich in diesen Theorien immer vorausgesetzt werden, dass wirklich vorhandene Empfindungen durch eine Erfahrung, die sie als unbegründet nachweist, aufgehoben werden können. Dafür ist aber nicht ein einziges wohl constatirtes Beispiel da. Bei allen Sinnestäuschungen, welche durch anomal erregte Empfindungen hervorgerufen werden, wird die täuschende Empfindung nie beseitigt durch die widersprechende bessere Erkenntniss des Objects und durch die Einsicht in die Ursache der Täuschung. Die Druckbilder, die feurigen Garben am Sehnerveneintritt, die Nachbilder u. s. w. bleiben an ihrem scheinbaren Orte im Gesichtsfelde bestehen, ebenso gut wie das von einem Spiegel entworfene Bild scheinbar hinter dem Spiegel fortfährt gesehen zu werden, obgleich wir von allen diesen Erscheinungen sehr wohl wissen, dass ihnen keine reelle Existenz zukommt. Es kann allerdings die Aufmerksamkeit abgelenkt sein und bleiben von Empfindungen, die zu den Objecten der Aussenwelt in gar keiner Beziehung stehen, wie zum Beispiel von den Empfindungen der schwächeren Nachbilder, der entoptischen Objecte und andern. Es können ferner mässig grosse Irrthümer in der Schätzung ihrer Intensität durch Contrast eintreten, oder wenn sie als gemeinschaftliche Wirkung zweier Objecte angeschaut werden, können sie falsch an die beiden Objecte vertheilt werden, wie das bei den Contrasterscheinungen vorkommt. Einer der Haupteinwürfe gegen die früheren Formen der empiristischen Theorie ist es ja immer gewesen, so lange man bewusste Schlüsse und Inductionsschlüsse noch nicht genügend unterschied, dass die Sinnestäuschungen durch die Einsicht in ihren Mechanismus und durch die entgegenstehende Erfahrung nicht aufgehoben werden. Was sollte aus unseren Sinneswahrnehmungen werden, wenn wir die Fähigkeit hätten, einen Theil derselben, der uns gerade nicht in den Zusammenhang unserer Erfahrungen passte, nicht nur nicht zu beachten, sondern in sein Gegentheil zu verkehren?

Denken wir zum Beispiel an den Fall zweier seitlich von der Medianebene liegenden Doppelbilder ein und desselben Objects. Das eine löst nach Hering's Theorie eine positive Tiefenempfindung aus, das andere eine negative, und zwar

nicht etwa eine von geringer Grösse, sondern wie es seine Theorie der stereoskopischen Phänomene voraussetzt, von sehr beträchtlicher und sehr deutlich erkennbarer Grösse. Aber weil wir wissen, dass die Doppelbilder zu einander gehören und Bilder eines Objects in einer uns mehr oder weniger gut bekannten Entfernung sind, sollen wir den Unterschied ihrer Tiefenempfindungen gewöhnlich nicht erkennen, selbst wenn wir darauf achten, ob das eine oder das andere etwa uns näher oder ferner erscheine. Nun erzeuge man einmal einen schwachen Farbenunterschied beider Bilder, indem man ein Auge vorher gegen eine Farbe ermüdet oder es von der Seite her beleuchtet, so haben wir einen wirklichen Unterschied der Empfindung beider Doppelbilder. Aber dieser Unterschied tritt hervor, auch wenn er zu den aller schwächsten gehört, und ohne Hilfe des binocularen Contrastes vielleicht gar nicht wahrnehmbar ist, trotzdem wir wohl wissen, dass die beiden Bilder Bilder desselben Objectes sind und also gleiche Farbe haben müssen, und trotzdem die Färbung keine objective, sondern eine subjective ist, und wir dies ebenfalls wissen.

Dann betrachte man das ganze System der Localisation, wie sie nach Hering durch unmittelbare Raumempfindung ursprünglich gegeben ist. Nach allen kleineren Verbesserungen, die man etwa noch daran anbringen könnte, um es der Wirklichkeit genauer anzupassen, würde es immer nur so viel leisten können, dass es eine richtige Localisation der Objecte für eine einzige Stellung der Blicklinien gäbe. In allen unendlich vielen anderen Fällen würde es mehr oder weniger falsch und durch Erfahrung zu verbessern sein. Die hypothetischen Annahmen von Hering machen also — vielleicht — die Erklärung der Gesichtswahrnehmungen in einem einzelnen Falle leichter, um sie in allen andern desto schwieriger zu machen; und jedenfalls muss man schliessen: Wenn die der Erfahrung entnommenen Momente im Stande sind, die richtige Erkenntniss der räumlichen Verhältnisse selbst entgegenstehenden directen Raumempfindungen gegenüber herzustellen, so müssen sie noch viel eher und leichter im Stande sein, dieselben richtig erkennen zu machen, wenn keine solche Hindernisse zu überwältigen sind [1].

Sobald wir dagegen alle Anschauung der Raumverhältnisse auf Erfahrung zurückführen, wie dies in der empiristischen Theorie geschieht, so kämpft in den Sinnestäuschungen niemals Empfindung gegen Erfahrung, sondern nur die eine Induction, welche unter gewissen beschränkten Bedingungen gewonnen ist, gegen die andere, die unter andern Bedingungen gewonnen ist. Wir haben es dann mit einem Kampfe gleichartiger Mächte zu thun und verstehen, dass bald die eine Seite, bald die andere je nach den veränderten Umständen, oder auch beide wechselnd unter gleich bleibenden Umständen unterliegen können.

---

[1] Ich wünsche, dass man diese Kritik, die ich im Interesse der Sache gegen Herrn E. Hering's Ansichten zu richten gezwungen war, nicht als einen Ausdruck persönlicher Gereiztheit wegen der Angriffe ansehen möge, die er gegen meine letzten Arbeiten gerichtet hat. Ich glaube, dass der Standpunkt einer nativistischen Theorie des Sehens, auf den sich Herr Hering gestellt hat, einen consequent denkenden Kopf ziemlich nothwendig zu der Art von Hypothesen führen musste, welche seiner Theorie zu Grunde liegen; und ich habe die Angriffe speciell gegen seine Ansichten gerichtet, weil sie mir die klarste und consequenteste Durchführung der nativistischen Theorie zu enthalten schienen, die zur Zeit noch möglich ist. Die Einwürfe, welche Herr Hering gegen meine Arbeiten gemacht hat, habe ich im Laufe dieser letzten Abtheilung zu beantworten gesucht, so weit sie sachliches Interesse haben. Die, welche nur persönliches Interesse haben, habe ich vorgezogen unerwähnt zu lassen, ausser, wo ich anerkennen musste, dass Herr Hering Recht gehabt hat.

Ich erkenne aber durchaus an, dass die hier discutirten Fragen noch nicht vollkommen spruchreif sind. Ich habe meinen eigenen Standpunkt theils wegen der Einfachheit der Erklärungen, die sich aus ihm ergeben, so gewählt, theils aber auch besonders aus methodologischen Rücksichten, indem ich es nämlich stets für rathsam halte, die Erklärungen der Naturprocesse auf die möglichst geringste Zahl und auf möglichst bestimmt gefasste Hypothesen zu bauen. Andererseits aber muss ich doch auch sagen, dass, je mehr ich im Fortgang dieser Untersuchungen, die mich einen guten Theil meines Lebens hindurch beschäftigt haben, lernte meine Augenbewegungen und meine Aufmerksamkeit mit freiem Willen zu beherrschen, es mir desto unzulässiger erschien, die wesentlichen Phänomene dieses Gebiets aus einem vorher schon gegebenen Nervenmechanismus erklären zu wollen.

Was die Unterschiede meiner hier gegebenen Darstellung, deren Wesentliches ich schon in einer populären Vorlesung im Jahre 1855 veröffentlicht habe, von anderen neueren Arbeiten betrifft, die auf der Grundlage einer empiristischen Theorie des Sehens fussen, so habe ich für die Abmessung der räumlichen Verhältnisse des Sehfeldes sowohl, als der Entfernung der gesehenen Objecte weniger Nachdruck auf die Muskelgefühle gelegt, als Wundt, weil ich dieselben aus den oben angeführten Gründen glaube für ziemlich ungenau und veränderlich halten zu müssen. Ich habe vielmehr die hauptsächlichsten Abmessungen des Sehfeldes aus der Deckung verschiedener Bilder mit denselben Netzhauttheilen hergeleitet. Wundt hat namentlich die hierher gehörigen psychischen Phänomene einer ausführlichen und sehr dankenswerthen Bearbeitung unterworfen. Einzelne Beobachtungen, in denen ich von ihm abweiche, sind oben notirt.

A. Nagel erklärt die Entstehung der binocularen Doppelbilder aus der Annahme, dass beide Augen ihre Netzhautbilder auf zwei verschiedene Kugelflächen nach aussen projicirten. Der Mittelpunkt dieser Kugelflächen wird im Kreuzungspunkt der Visirlinien des entsprechenden Auges angenommen, und beide Kugelflächen sollen sich im Fixationspunkte schneiden. Dabei muss also eigentlich jeder Punkt, der nicht in der Schnittlinie beider Kugeln liegt, in Doppelbildern erscheinen. Diese Projectionen denkt sich Nagel nun von dem Halbirungspunkt der Verbindungslinie beider Augenmittelpunkte aus angesehen, und je nachdem sich dabei die Doppelbilder decken, oder gekreuzt oder gleichseitig neben einander liegend erscheinen, sollen sie es auch im Gesichtsfelde thun.

Nagel's Theorie kommt zwar der Wahrheit schon ziemlich nahe; aber einmal ist sie etwas künstlich, da sie eine doppelte Projection voraussetzt, zweitens fehlt in Wirklichkeit die Anschauung einer verschiedenen Entfernung der beiden Doppelbilder, welche Nagel's Theorie in den meisten Fällen fordert; endlich würde ihr zufolge die Lage der einfach gesehenen Bilder nicht immer genau mit der Wirklichkeit stimmen. Uebrigens ist dies wohl der einzige wesentliche Punkt, in welchem meine oben gegebene Theorie von der Nagel's abweicht.

Die richtige Theorie der Doppelbilder und ihrer Lage wurde dagegen von A. Classen gegeben, wenn auch dabei mit Unrecht die factische Richtigkeit der von Hering angegebenen Phänomene, welche sich auf das scheinbare Centrum der Richtungslinien mitten zwischen beiden Augen beziehen, geleugnet ist. Ich selbst bin zwar, ebenso wenig wie Herr Classen, geneigt, diese Erscheinung zur Grundlage aller unserer Localisationen zu machen, und halte sie nur für eine nebenher gehende Sinnestäuschung, die bei mir selbst auch für das rechte und linke Auge in verschiedenem Grade stattfindet und durch geschärftere Aufmerksamkeit überwunden werden kann; aber es ist eine Täuschung, die wirklich besteht.

Eine wesentlichere Abweichung zwischen der von mir gegebenen Darstellung der Theorie und Classen's ist, dass er den Ortssinn der Netzhaut und die Projection in das Sehfeld als ursprünglich gegeben und nicht erworben betrachtet. Wenn aber die Lage der einzelnen

52 *

Netzhautpunkte zu einander durch eine angeborene Empfindung gegeben ist, dann ist auch die Identität correspondirender Punkte angeboren, da deren gleiche Lage gegen den Blickpunkt dann ebenfalls ursprünglich in der Empfindung gegeben sein muss. Es hat diese Abweichung indessen auf die Darstellung derjenigen Capitel des Sehens, die CLASSEN ausführlich behandelt, namentlich die Lehre vom Muskelsinn und vom Binocularsehen, keinen Einfluss, und es finden sich bei ihm eine grosse Menge interessanter Erläuterungen aus der pathologischen Beobachtung für die vorgetragenen physiologischen Lehren.

Die der empiristischen Theorie sich anschliessenden Ansichten von H. MEYER, DONDERS, VOLKMANN, A. FICK, einzelne Theile der Theorie betreffend, sind jede an ihrer Stelle erwähnt worden.

Darstellungen der empiristischen Theorie.

1855. HELMHOLTZ. Ueber das Sehen des Menschen. Ein populär wissenschaftlicher Vortrag, gehalten zu Königsberg i. Pr., zum Besten von KANT's Denkmal. Leipzig, L. Voss.
1861. A. NAGEL. Das Sehen mit zwei Augen und die Lehre von den identischen Netzhautstellen. Leipzig und Heidelberg.
1862. W. WUNDT. Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig und Heidelberg.
1863. A. CLASSEN. Das Schlussverfahren des Sehactes. Rostock.
1864. A. FICK. Lehrbuch der Anatomie und Physiologie der Sinnesorgane. Lahr. Heft 2.
— W. WUNDT. Vorlesungen über Menschen- und Thierseele. Leipzig, Voss. Zwei Bände.

Nachträge.

§ 1. Formen des Sehorgans im Allgemeinen.

Ueber Insectenaugen.

1856. DUJARDIN. *Remarques sur certaines dispositions de l'appareil de la vision chez les insectes. C. R.* XLII, 941. *Inst.* 1856. 194.

§. 2. Sehnenhaut und Hornhaut.

Ueber Dimensionen des Auges.

1855. SAPPEY. In *Gazette médicale.* 1855. Nr. 26, 27.
1857. ARLT im Archiv für Ophthalmologie. III, 2. S. 87.
1858. NUNNELEY. *On the organs of vision.* London. p. 129.
1861. v. JÄGER. Ueber die Einstellungen des dioptrischen Apparats im menschlichen Auge. Wien.

Messungen der Hornhautkrümmung.

1859. J. H. KNAPP. Die Krümmung der Hornhaut des menschlichen Auges. Habilitationsschrift. Heidelberg. — Auch im Archiv für Ophthalmol. VI, 2. S. 1—52.
1860. MEYERSTEIN. Beschreibung eines Ophthalmometers nach HELMHOLTZ. Pogg. Ann. CXI, 415—425. HENLE u. PFEUFER Zeitschr. XI, 185—192.
1864. R. SCHELSKE. Ueber das Verhältniss des intraocularen Drucks zur Hornhautkrümmung. Archiv für Ophthalm. X, 2. p. 1—46.

§. 3. Die Uvea.

Darüber, dass der mittlere Theil der Iris im normalen Auge der Linse anliegt, scheint allgemeines Einverständniss zu herrschen. Nur darüber sind die Ansichten noch verschieden, wie viel freien Raum man sich zwischen dem peripherischen Theile der Iris und den vorderen Rändern der Ciliarfortsätze und

der Zonulafalten zu denken habe, ob auch hier der Zwischenraum nur spaltförmig sei, wie Cramer, van Reeken, Rouget und Henke annehmen, oder ob dort der Meinung von Arlt gemäss ein offener ringförmiger Raum, einer hintern Augenkammer entsprechend, existire. Da im todten Auge die Ciliarfortsätze blutleer und zusammengefallen sind, und man nicht genau weiss, wie weit sie durch Blut aufgeschwellt werden, so ist darüber schwer zu entscheiden.

In den Figuren *Taf. 1*, *Fig. 1* und 3 habe ich die Ciliarfortsätze wohl zu weit mit der Iris in Verbindung gebracht; ich habe den Zusammenhang dieser Theile nach Durchschnitten getrockneter Präparate, wie *Fig. 2* eines ist, gezeichnet, in denen aber durch das Trocknen der einspringende Winkel der Pigmentschicht zwischen Ciliarfortsätzen und Iris herausgezerrt und verflacht worden zu sein scheint. An frischen Präparaten sind die Ciliarfortsätze an ihrem vorderen Ende allerdings durch einen viel tieferen Einschnitt von der Iris getrennt, als die angegebenen Figuren es darstellen.

1855. van Reeken. Ontleedkundig onderzoek van den toestel voor accommodatie van het Oog. Onderzoekingen gedaan in het Physiol. Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VII, 248—586.
— Rouget in *Gaz. méd.* 1855. Nr. 50.
1860. W. Henke. Der Mechanismus der Accommodation für Nähe und Ferne. Archiv für Ophthalm. VI, 2. S. 53—72.
1863. O. Becker. Lage und Function der Ciliarfortsätze im lebenden Menschenauge. Wien. Medic. Jahrbücher. S. 159.

In Betreff des Ciliarmuskels ist die Entdeckung von H. Müller und Rouget zu erwähnen, dass die inneren gegen die Ciliarfortsätze hingekehrten Theile dieses Muskels zwischen die oben beschriebenen meridional gerichteten Fasern eine grosse Menge ringförmig, dem Aequator der Linse parallel verlaufende Bündel eingewebt enthalten. Diese äquatorial verlaufenden Fasern gehen übrigens vielfältig in meridional gerichtete über. Ueber die Wirkung dieser Fasern unten mehr in den Nachträgen zu §. 13.

1856. C. Rouget. *Recherches anatomiques et physiologiques sur les appareils érectiles. Appareil de l'adaptation de l'oeil. C. R.* XLII, 937—941. *Institut.* 1856. p. 193—194. *Cosmos.* VIII, 559—560.
— H. Müller. *Réclamation de priorité. C. R.* XLII, 1218—1219.
— C. Rouget. *Réponse à une réclamation de priorité addressée par* M. Müller. *C. R.* XLII, 1255—1256. *Institut.* 1856. p. 245. *Cosmos.* IX, 9,
1857. H. Müller. Ueber einen ringförmigen Muskel am Ciliarkörper. Archiv für Ophthalmol. III, 1.
— Arlt. Zur Anatomie des Auges. Ebenda. III, 2.
1858. H. Müller. Einige Bemerkungen über die Binnenmuskeln des Auges. Ebenda. IV, 2. p. 277—285.

Was den Dilatator der Pupille betrifft, so ist dessen Existenz und Lage auch immer noch eine sehr bestrittene Frage. Die Gefässtämme der Iris sind ziemlich stark mit Muskelfasern belegt; ausser diesen Fasern beschreiben verschiedene Anatomen verschiedene Fasersysteme, die sie als *Dilatator pupillae* betrachten, die dagegen von anderen wieder geleugnet werden.

J. Henle. Handbuch der systematischen Anatomie des Menschen. II, 635. Braunschweig 1866.

§. 4. Die Netzhaut.

Die feinere Anatomie der Netzhaut hat die Anatomen noch viel beschäftigt und ist beträchtlich verfeinert worden. J. Henle unterscheidet in der neusten Zusammenfassung der von ihm selbst und anderen Beobachtern erhaltenen Resultate folgende Schichten:

Musivische Schicht		1) Stäbchenschicht 2) Aeussere Limitans 3) Körnerschicht.
Aeussere Faserschicht		4) Aeussere Faserschicht.
Nervöse Schicht	Graue Substanz	5) Aeussere granulirte Schicht 6) Aeussere gangliöse Schicht 7) Innere granulirte Schicht 8) Innere gangliöse Schicht
	Weisse Substanz	9) Nervenfaserschicht
Grenzmembran		10) *Limitans hyaloidea.*

Davon vertritt 1 die Stäbchenschicht, 3 die äussere Körnerschicht, 4 und 5 die Zwischenkörnerschicht, 6 die innere Körnerschicht, 7 die feingranulirte Schicht, 8 Nervenzellenschicht, 9 die Ausbreitung des Sehnerven der oben S. 20 gegebenen Aufzählung.

Die Stäbchen der hintersten Netzhautschicht sind selbst aus je zwei stäbchenförmigen Gliedern zusammengesetzt, von denen das innere aus einer schwächer lichtbrechenden Substanz besteht und dicker ist (0,0018 bis 0,0022 Mm. Durchmesser) als das äussere stärker lichtbrechende (0,0013 bis 0,0018 Durchmesser). Die inneren Abtheilungen der Stäbchen liegen in gleichem Niveau mit den dickeren flaschenförmigen Innengliedern der Zapfen, deren äussere Abtheilungen, die oben schon erwähnten Zapfenstäbchen, mit den äusseren Abtheilungen der Stäbchen in einer Reihe liegen, aber kürzer sind als diese und deshalb nicht so weit gegen die Aderhaut reichen. Der Durchmesser des dickeren inneren Theils der Zapfen steigt bis 0,004 und 0,006 Mm.; nur in der Netzhautgrube, wo zwischen den Zapfen keine Stäbchen mehr stehen, sind die Zapfen dünner (inneres Ende 0,002 bis 0,0025 Mm. nach M. Schultze, in einem kleinen Bezirk 0,0015 bis 0,002 nach H. Müller, zwischen 0,0031 und 0,0036 nach Welcker). Die Zapfen des gelben Flecks zeichnen sich ausserdem nach M. Schultze durch eine fast doppelt so grosse Länge vor denen der übrigen Netzhaut aus.

Die Körnerschicht (äussere Körnerschicht) enthält nach Henle in vielen Schichten übereinander ellipsoidische Körner, die im frischen Zustande eine eigenthümliche, sehr zierliche Querstreifung zeigen. Jedes Korn zeigt in der Regel drei hellere Bänder, die durch dunklere getrennt und der optische Ausdruck von Schichten zweier abwechselnder Substanzen sind, die der Fläche der Netzhaut parallel das Korn durchziehen. An gut erhärteten Präparaten sieht man diese Körner in regelmässigen Reihen, die senkrecht zur Netzhautfläche sind, übereinander geschichtet. Sie verhalten sich auch gegen Reagentien wesentlich anders als die Nervenzellen, so dass sie von diesen durchaus zu unterscheiden sind. Ihre längere Axe, welche senkrecht zur Fläche der

Netzhaut steht, misst 0,006 bis 0,007 Mm., die kleinere Axe mitunter nicht viel mehr als die Hälfte.

In die Körnerschicht ragen auch hinein die oben schon erwähnten Zapfenkörner, welche einen Kern enthalten und sich nach innen hin in eine cylindrische glatte glänzende Faser von 0,0015 Mm. Durchmesser fortsetzen, welche durch die Dicke der Körnerschicht zu verfolgen ist, und dann bald mit, bald ohne eine zellenähnliche Anschwellung an die äussere granulirte Schicht tritt.

Hier scheint sich dieselbe nach M. Schultze in eine grosse Zahl feinster Fasern aufzulösen, die in die äussere granulirte Schicht eintreten und dann nicht weiter zu verfolgen sind. Von den Stäbchen gehen ebenfalls feine Nervenfasern ab, mit denen die Körner der äusseren Körnerschicht zusammenhängen und welche den Zapfenfasern entsprechen, nur viel feiner sind als diese. Auch diese haben eine Anschwellung, wo sie an die äussere granulirte Schicht stossen, und lassen sich in diese hinein nicht verfolgen.

Eine besondere Faserschicht (äussere Faserschicht Henle) ist in der Regel nur in und um den gelben Fleck und an der *Ora serrata* der Netzhaut, also längs ihres äusseren Randes zu erkennen. Die Fasern des gelben Flecks laufen radial, von dem Centrum der Netzhautgrube als Mittelpunkt aus divergirend, nach allen Seiten, und laufen hauptsächlich der Fläche der Netzhaut parallel, indem sie theils bündelweis aus der Körnerschicht aufsteigen und an die horizontal streichenden Faserzüge sich anschliessen, theils von diesen sich loslösend in die äussere granulirte und Nervenzellenschicht sich einsenken. Diese Fasern stellen wahrscheinlich die Verbindung zwischen den Zapfen der Netzhautgrube und den in ihrer Umgebung massenhaft angehäuften Nervenzellen her; freilich macht es die grosse Menge der genannten Fasern nach Henle's Meinung zweifelhaft, ob alle einem solchen Zwecke dienen. Welche Rolle diese Fasern wahrscheinlich bei der Erzeugung von Haidinger's Büscheln im polarisirten Lichte spielen, ist auf S. 422—423 auseinandergesetzt.

An den übrigen vorderen Schichten der Netzhaut sind wesentlich neue Verhältnisse nicht aufgefunden worden. Ein grosser Theil der radiären, Müller'schen Fasern, namentlich die, welche mit der *Membrana limitans hyaloidea* verschmelzen, sind jedenfalls Bindegewebfasern. Ueber den Verlauf der eigentlichen Nervenfasern, die nach Max Schultze an ihrem perlschnurähnlichen Ansehen erkannt werden können, ist mit Ausnahme ihres Verlaufs in der vordersten Schicht der Netzhaut, der Ausbreitung des Sehnerven, noch nichts Vollständiges bekannt.

Im Grunde der Netzhautgrube verschmelzen die beiden Nervenzellenschichten mit einander und mit der Körnerschicht, hinter diesen liegen die Zapfen, alle andern Schichten fehlen.

1856. H. Müller. Anatomische Beiträge zur Ophthalmologie. Archiv für Ophthalmologie. II, 2. S. 1. III, 1. S. 1. IV, 1. S. 269.

— Derselbe. Anatomisch-physiologische Untersuchungen über die Retina bei Menschen und Wirbelthieren. Siebold und Kölliker Zeitschrift für wissensch. Zoologie. VIII, 1. *C. R.* XLIII. Oct. 20.

1857. C. Bergmann. Anatomisches und Physiologisches über die Netzhaut des Auges. Zeitschr. für rationelle Medicin. (3) II, 83,

1858. Nunneley. *On the structure of the retina. Quarterly Journal of microscop. science.* 1858. Juli. 217.

1859. Ritter. Ueber den Bau der Stäbchen und äusseren Endigungen der Radialfasern an der Netzhaut des Frosches. Archiv für Ophthalm. V, 2. S. 101.
— M. Schultze. *De retinae structura penitiori. Bonn.*
1859. E. v. Wahl. De retinae textura in monstro anencephalo. Dissert. Dorpat.
1860. W. Manz. Ueber den Bau der Retina des Frosches. Zeitschr. für ration. Medicin. (3) X, 301.
— G. Braun. Eine Notiz zur Anatomie und Bedeutung der Stäbchenschichte der Netzhaut. Wiener Sitzungsber. XLII, 15—18.
— W. Krause. Ueber den Bau der Retinastäbchen beim Menschen. Göttinger Nachrichten. 1861. Nr. 2. Zeitschr. für ration. Medicin. (3) XI, 175.
1861. M. Schultze. Sitzungsber. der niederrheinischen Ges. 1861. S. 97. Archiv für Anatomie und Physiol. 1861. S. 785. Archiv für mikrosk. Anatomie. II, 175—286.
— Ritter im Archiv für Ophthalm. VIII, 1.
1862. H. Müller. Bemerkungen über die Zapfen am gelben Fleck des Menschen. Würzburger naturwiss. Zeitschr. II, 218.
— Derselbe. Ueber das Auge des Chamäleon. Ebenda. III, 10.
1863. Schiess. Beitrag zur Anatomie der Retinastäbchen. Zeitschr. für ration. Medicin. (3) XVIII, 129.
— H. Welcker. Untersuchung der Retinazapfen bei einem Hingerichteten. Ebenda. XX, 173.
— W. Krause. Ebenda. XX, 7.
1865. Blessig. De Retinae textura. Dissert. Dorpat.
1866. J. Henle. Handbuch der systematischen Anatomie des Menschen. II, 636—670.

§. 5. Die Krystallinse.

1852. D. Brewster. *On the development and extinction of regular doubly refracting structures in the cristalline lenses of animals after death. Phil. Mag.* (4) III, 192—198.
1859. G. Valentin. Neue Untersuchungen über die Polarisationserscheinungen der Krystallinsen des Menschen und der Thiere. Archiv für Ophthalm. IV, I, 227—268.
— D. Brewster. *On certain abnormal structures in the crystalline lenses of animals and in the human crystalline. Rep. of Brit. Assoc.* 1858. 2, p. 7.
1863. F. J. v. Becker. Ueber den Bau der Linse bei dem Menschen und den Wirbelthieren. Archiv für Ophthalm. IX (2), 1—42.

§. 10. Brechung der Strahlen im Auge.

Donders giebt folgende Uebersicht einer grossen Anzahl von Messungen der Hornhautkrümmung in der Gesichtslinie. Die Mittelwerthe derselben waren in Millimetern.

A. Männer.

1)	20 unter 20 Jahren	7,932
2)	51 unter 40 „	7,882
3)	28 über 40 „	7,819
4)	11 über 60 „	7,809
	Mittel	7,858
	Maximum	8,396
	Minimum	7,28

B. Weiber.

1)	6 unter 20 Jahren	7,720
2)	22 unter 40 „	7,799
3)	16 über 40 „	7,799
4)	2 über 60 „	7,607
	Mittel	7,799
	Maximum	8,487
	Miminum	7,115

C. Nach der Sehweite.

1)	27 Normalsichtige	7,785
2)	25 Myopische	7,874
3)	26 Hypermetropische	7,96.

1852–61. L. L. Vallée. *Théorie de l'oeil.* *C. R.* XXXIV, 321—323, 718—720; 720—722; 789—792; 872—876. XXXV, 679—681. LI, 678—680. LII, 702—703; 1020—1021. *Mém. des savants étrangers.* XII, 204—264. XV, 98—118; 119—140.
1857. W. Zehender. Ueber die Brewstersche Methode zur Bestimmung der Brechungsexponenten flüssiger und festweicher Substanzen. Archiv für Ophthalmol. III, 2, S. 99.
1858. N. Lubimoff. *Recherches sur la grandeur apparente des objets.* *C. R.* XLVII, 24—27. *Ann. de chimie.* (3), LIV, 13—27.
1860. Breton. *Note sur une propriété du cristallin de l'oeil humain.* *C. R.* L, 498—499.
1864. Giraud Teulon. *Nouvelle étude de la marche des rayons lumineux dans l'oeil.* *Ann. d'oculistique.* 1864.
— F. C. Donders. *On the anomalies of accommodation and refraction of the eye.* London. p. 38—71.

§. 11. Zerstreuungsbilder auf der Netzhaut.

Die Lehre von den individuellen Verschiedenheiten des Refractionszustands der Augen ist namentlich durch die wichtigen Arbeiten von Donders vollständig aufgehellt worden und hat denn auch schon die fruchtbarste Anwendung in der Augenheilkunde gefunden, nicht blos direct für die Verbesserung mangelhaften Accommodationsvermögens durch Brillen, sondern auch indirect, indem eine Reihe bisher dunkler Krankheitszustände sich als Folge mangelhafter Refraction und Accommodation des Auges ergaben.

Der Fortschritt, den Donders gemacht hat, hängt namentlich davon ab, dass er getrennt hat die Erscheinungen, welche einem *abnormen Refractionsgrade* im Ruhezustande des Auges angehören bei der Accommodation für die Ferne, von denen, welche sich auf die grössere oder geringere Breite der *Accommodation* beziehen und die also in einer Aenderung des Refractionszustandes durch Muskelthätigkeit bestehen.

Für die Ansicht, dass der Zustand des Fernsehens der Ruhezustand des Auges sei, für welche schon die subjective Empfindung sehr entschieden spricht und die auch meiner oben gegebenen Darstellung zu Grunde liegt, führt Donders noch weiter an, dass durch gewisse narkotische Stoffe (namentlich Atropin, das Alkaloid der Belladonna) eine Lähmung des Ringmuskels der Pupille und der Accommodation hervorgebracht wird, wobei das Auge für seinen Fernpunkt eingerichtet ist, ohne diesen Refractionszustand ändern zu können. Sollte ein muskulöser Apparat da sein, dessen Contraction die Accommodation für die Ferne verstärken könnte, so müsste man die sehr unwahrscheinliche Annahme machen, dass dieser durch das Atropin nicht gelähmt, sondern in eine dauernde krampfhafte Zusammenziehung gebracht würde.

Daneben lehren pathologische Beobachtungen, dass wenn durch Lähmung des *Nervus oculomotorius* der Accommodationsapparat gelähmt wird, das Auge sich stets auf seinen früheren Fernpunkt dauernd einstellt. Dagegen sind durchaus keine Fälle von Bewegungslähmungen des Auges beobachtet worden, wobei der Fernpunkt sich genähert hätte.

Die grösste Sehweite entspricht also dem Ruhezustande des Auges. Als normale Lage des Fernpunktes kann die in unendlicher Ferne betrachtet werden. Solche Augen nennt DONDERS emmetropisch (von ἔμμετρος, *modum tenens*, und ὤψ, *oculus*), um die Vieldeutigkeit des Ausdrucks „normale“ oder „normalsichtige“ Augen zu vermeiden. Emmetropische Augen können natürlich noch an mancherlei anderen Fehlern leiden und brauchen nicht „normal“ zu sein.

Augen, deren Fernpunkt vor ihnen, aber nicht in unendlicher Ferne liegt, nennt er brachymetropisch oder, mit dem älteren Namen, myopisch; diese Augen können nur divergirend einfallende Strahlenbündel auf der Netzhaut vereinigen.

Augen, die im Gegentheil nicht nur parallele, sondern auch convergirend einfallende Strahlen vereinigen können, heissen hypermetropisch.

Die myopischen Augen können sich ohne Hilfe eines Brillenglases für weit entfernte Objecte nicht einstellen; es mangelt ihnen also ein wichtiger Theil der Fähigkeit eines emmetropischen Auges. Die hypermetropischen dagegen sind genöthigt jedes Mal, wo sie ein reelles Object fixiren wollen, eine Accommodationsanstrengung zu machen, wodurch mannigfache und häufig sehr störende Ermüdungserscheinungen herbeigeführt werden. Beiderlei Arten der Abweichung sind also für den praktischen Gebrauch des Auges nachtheilig und werden deshalb von DONDERS unter dem Namen der ametropischen Augen zusammengefasst.

Der Grund dieser Abweichungen beruht der Regel nach auf der verschiedenen Länge der Augenaxen, die in den hypermetropischen kürzer ist, als in den emmetropischen. Damit hängt auch die Lage des Drehpunkts dieser Augen zusammen, der, wie auf Seite 459 bemerkt wurde, in den myopischen Augen weiter nach hinten, in den hypermetropischen weiter nach vorn liegt. Die Hornhaut und Linse zeigen in der Regel keine Krümmungsänderungen, aus denen die Ametropie erklärt werden könnte.

Um den Zustand solcher abweichender Augen vollständig zu bestimmen, muss ferner die Grösse der Veränderung bestimmt werden, welche durch active Muskelanstrengung in ihrem Brechungszustande hervorgebracht werden kann. Wenn wir ein emmetropisches Auge, welches zwischen unendlicher Ferne und einer Sehweite von 6 Zoll sich für jedes Object einstellen kann, und ein stark myopisches, welches zwischen 6 und 3 Zoll Entfernung accommodiren kann, mit einander vergleichen, so scheint auf den ersten Anblick vielleicht das letztere eine viel engere Grenze der Accommodationsfähigkeit zu haben, als das erstere. Wenn wir aber dicht vor ein solches myopisches Auge eine Concavlinse von 6 Zoll Brennweite setzen, welche ihm erlaubt unendlich entfernte Gegenstände deutlich zu sehen, so werden wir finden, dass dasselbe Auge mit Hilfe dieser Brille nun auch, wie das zuerst genannte emmetropische Auge zwischen unendlicher Ferne und 6 Zoll Abstand accommodiren kann, also eine ebenso grosse Breite der Accommodation hat, wie das erstere. Die genannte Linse mit 6 Zoll negativer Brennweite entwirft nämlich von Objecten, die 6 Zoll hinter ihr liegen, ein virtuelles Bild in 3 Zoll Entfernung, für welches sich also das supponirte myopische Auge accommodiren kann.

Wir können also die Accommodationsbreite zweier verschieden fernsichtiger Augen nicht unmittelbar nach dem Abstand ihres Fernpunkts vom Nahpunkte mit einander vergleichen, sondern wir müssen sie durch eine vorgesetzte Linse erst auf gleichen Refractionszustand gebracht denken, um sie vergleichen zu können.

Soll eine solche Linse die Objecte nicht vergrössern oder verkleinern, so muss ihr zweiter Knotenpunkt mit dem ersten des Auges zusammenfallen (was sich praktisch, wenn es der Mühe werth erscheinen sollte, bei dicken convex-concaven Linsen erreichen lassen würde; vergleiche Seite 61 und 62). Nennen wir die Entfernung des Fernpunktes eines gegebenen Auges vom ersten Knotenpunkte F, die des Nahepunktes N, und A die Entfernung des nächsten Punktes, für den das mit einer Linse von der negativen Brennweite F versehene Auge sich noch accommodiren kann, so ist

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{N} - \frac{1}{F}$$

und die Grösse $\frac{1}{A}$ wird von Donders als Maass der Accommodationsbreite benutzt.

Die Einheit dieses Accommodationsmaasses ist also Eins dividirt durch das Längenmaass, wozu bisher, den Brillennummern entsprechend, entweder Pariser oder Preussische Zolle gewählt sind. Man könnte sich vielleicht erlauben, eine solche Einheit ein Zolltel zu nennen, wenn Verwechselungen verschiedener Längenmaasse zu fürchten wären.

So haben also gleiche Accommodationsbreite von ein Sechstel 1. ein emmetropisches Auge, dessen Sehweite von 6 Zoll bis Unendlich geht, 2. ein myopisches, dessen Sehweite von 3 bis 6 Zoll geht, 3. ein hypermetropisches, dessen Sehweite von + 12 bis — 12 Zoll geht, da

$$\frac{1}{6} - \frac{1}{\infty} = \frac{1}{3} - \frac{1}{6} = \frac{1}{12} - \left(-\frac{1}{12}\right) = \frac{1}{6}.$$

Die Grösse der Accommodation $\frac{1}{A}$ nimmt mit zunehmendem Lebensalter continuirlich ab, und zwar bei ganz oder nahehin emmetropischen Augen annähernd proportional den Jahren, so dass sie im zehnten Jahre im Mittel $^3/_8$ Zolltel beträgt, im 65. Jahre Null wird. Verlust der Accommodationsfähigkeit findet also im höheren Lebensalter regelmässig Statt, und auf diesen Zustand hat Donders den Namen der Presbyopie beschränkt. Dabei ist aber noch zu bemerken, dass im höheren Alter, etwa vom 50. Jahre ab, auch der Fernpunkt des Auges etwas hinausrückt, früher emmetropische Augen also hypermetropisch, schwach myopische emmetropisch werden.

Die allmälige Verminderung der Accommodationsbreite hängt wahrscheinlich davon ab, dass die Festigkeit der äusseren Schichten der Krystallinse wächst und die Linse deshalb weniger nachgiebig wird. Vermehrung des Brechungscoefficienten ihrer äusseren Schichten muss nach Seite 75 auch eine Verminderung der Brechung in der Linse zur Folge haben und also den hintern Brennpunkt des Auges nach hinten rücken lassen.

Zu erwähnen ist noch, dass wir der Regel nach immer Convergenz- und Accommodationsanstrengung gleichzeitig vollführen und daher auch unwillkührlich eine bestimmte Verbindung zwischen beiden Anstrengungen einhalten (siehe S. 472—475). Jemand, der seine Accommodation nicht willkührlich beherrschen gelernt hat, accommodirt deshalb besser für die Ferne bei parallelen Gesichtslinien und erreicht die stärkste Anstrengung der Accommodation besser bei stark convergenten Gesichtslinien.

Donders unterscheidet daher 1. die absolute Accommodationsbreite, wo der Fernpunkt genommen wird bei parallelen (oder selbst divergenten) Blicklinien, der Nähepunkt bei möglichst stark convergenten. Der Nahepunkt der Accommodation liegt hierbei ferner als der Convergenzpunkt. Es ist dies die grösste erreichbare Accommodationsbreite, sie betrug bei einem emmetropischen Beobachter im Alter von 15 Jahren $\frac{1}{3,69}$.

2. Die binoculare Accommodationsbreite. Die Convergenz wird hierbei nicht stärker gemacht, als zur Fixirung des Punktes, für den man accommodirt, nöthig ist. Man erreicht hierbei nicht ganz denselben Grad der Accommodation, wie im ersten Falle. Die Breite der binocularen Accommodation desselben Beobachters war $\frac{1}{3,9}$.

3. Die relative Accommodationsbreite für einen gegebenen Grad der Convergenz. Dieser war für denselben Beobachter bei parallelen Gesichtslinien nur gleich $\frac{1}{11}$, erreichte bei einer Convergenz von 11° ihr Maximum von $\frac{1}{5,76}$, blieb dann bei steigender Convergenz ziemlich unverändert, so dass sie bei 23° noch $\frac{1}{6,4}$ betrug, und bei der Stellung des binocularen Nahpunkts, bei 38° Convergenz, $\frac{1}{9}$. In der Stellung des absoluten Nahpunkts, bei 73° Convergenz, war sie Null.

Für ärztliche Zwecke müssen also bestimmte Grade der Convergenz gewählt werden, um vergleichbare Grade der Accommodation zu erhalten, und man muss mit passend gewählten Linsen, die man vor das Auge setzt, dem Patienten die Accommodation bei einem solchen Convergenzgrade möglich zu machen suchen.

Für die Bestimmung des Fernpunkts empfiehlt sich die parallele Richtung der Gesichtslinien auf ein entferntes Object; die Brennweite der schwächsten concaven Linsen, welche einem myopischen, oder der stärksten convexen Linsen, welche einem hypermetropischen Auge noch vollkommen genaues Sehen sehr entfernter Objecte gestatten, ist unmittelbar gleich der Entfernung des Fernpunktes vom Auge. Für die Bestimmung des Nahpunktes schreibt Donders vor, ihn durch passende Convexgläser stets bis auf etwa 8 Zoll heranzubringen, wenn er weiter abliegen sollte, um einer genügenden Accommodationsanstrengung sicher zu sein. Dabei muss dann natürlich der Einfluss der Linse auf die Lage des gesehenen Bildes in Rechnung gebracht werden.

Als Probeobjecte zur Prüfung der Sehweite ungeübter Beobachter dienen Buchstaben und Ziffern verschiedener Grösse[1].

Im Ganzen ist es rathsam bei Augen, deren Sehweite für die gewählte Beschäftigung nicht genügt, rechtzeitige Unterstützung durch passende Brillen anzuwenden. Presbyopische Augen brauchen eine Convexbrille beim Lesen und Schreiben, überhaupt bei der Beschäftigung mit nahen Objecten, um die Zerstreuungskreise zu vermindern. Des Abends und bei schwacher Beleuchtung, wenn die Pupille weit ist und deshalb die Zerstreuungskreise grösser, ist eine stärkere Brille nothwendig als bei Tage und bei stärkerer Beleuchtung. In der Regel genügt eine Brille, welche den Nahepunkt auf 10 bis 12 Zoll heranbringt; nur bei sehr alten Leuten, zwischen 70 und 80 Jahren, wo die Gesichtsschärfe sich beträchtlich vermindert, ist es wünschenswerth, die Objecte bis auf 8 oder 7 Zoll heranbringen zu können, um sie unter grösserem Gesichtswinkel zu sehen.

Bei myopischen Augen ist namentlich darauf zu sehen, dass bei der Beschäftigung mit nahen Gegenständen gebückte Haltung des Kopfes und starke Convergenz der Augen vermieden wird, weil die Verdünnung, Ausbauchung und Zerrung der Membranen im hinteren Theile des Auges durch gesteigerten Blut- und Muskeldruck schnell wächst und die höheren Grade der Myopie das Sehvermögen sehr erheblich beeinträchtigen und gefährden. Bei den schwächeren Graden von Kurzsichtigkeit, wobei der Fernpunkt über 5 Zoll vom Auge liegt, ist es im Allgemeinen zulässig concave Brillengläser anzuwenden und fortdauernd zu tragen, welche den Fernpunkt in unendliche Ferne rücken. Das myopische Auge wird dadurch einem emmetropischen ähnlich gemacht. Dabei ist aber sehr sorgfältig darauf zu achten, dass Bücher, Papierblätter, auf denen geschrieben wird, und Handarbeiten nicht näher als 12 Zoll den Augen genähert werden. Bei übrigens guter Beschaffenheit des Auges ist in dieser Entfernung ohne Schwierigkeit möglich zu lesen und zu schreiben. Zwingen die Umstände gebieterisch zu feinerer Arbeit, die den Augen näher gebracht werden muss, so ist der Gebrauch schwächerer Concavgläser und vielleicht achromatisirter prismatischer Gläser, die auf der Nasenseite dicker als auf der Schläfenseite sind, rathsam, weil dann die sehr genäherten Objecte mit geringerer Convergenz und geringerer Anstrengung der Accommodation gesehen werden können.

Gläser, welche die Myopie vollkommen neutralisiren, können zuweilen bei solchen Kurzsichtigen, die noch nie Brillen getragen haben, erst nach einiger Gewöhnung an schwächere Gläser, statt deren man nach und nach schärfere substituirt, angewendet werden, weil die Verbindung zwischen Accommodation und Convergenz den neuen Umständen allmälig angepasst werden muss. Bei geringerer Accommodationsbreite oder merklich verminderter Gesichtsschärfe ist es überhaupt rathsamer, für nahe Objecte schwächere Brillen zu tragen, die für die gewöhnlichen Beschäftigungen genügen, und für ferne Objecte eine Lorgnette zu Hilfe zu nehmen.

---

[1] Dergleichen sind herausgegeben von JAEGER jun.: Schriftscalen, Wien 1857; und SNELLEN, *Test types for the determination of the acuteness of vision*; London, Williams and Norgate; Paris, Germer Baillière; Berlin, Peters; Utrecht, Greven. Die letztern sind in regelmässiger Abstufung der Grösse ausgeführt und mit Nummern versehen, welche die Zahl der Pariser Fusse angeben, um welche entfernt ein normales Auge die Buchstaben noch lesen kann. Aehnliche auch von GIRAUD TEULON. Paris, Nachet.

Bei höheren Graden von Myopie ist das Auge überhaupt schon leidend und gefährdet; es sind dann mancherlei andere Rücksichten noch zu nehmen, die hier nicht weiter erörtert werden können, und der Rath eines intelligenten Arztes jedenfalls nothwendig. Ueberhaupt ist die Gleichgiltigkeit, womit die meisten Kurzsichtigen den Zustand ihrer Augen betrachten, die Ursache späterer Entwickelung gefährlicher Augenkrankheiten und vieler Erblindungen, und es kann nicht genug vor Nachlässigkeit in dieser Hinsicht gewarnt werden.

Hypermetropische Augen brauchen convexe Linsen, und zwar wähle man im Anfang, wo sie ihre fortdauernde Accommodationsanstrengung noch nicht ganz zu beseitigen wissen, etwas zu starke Gläser, durch die sie schon ferne Objecte nicht mehr ganz deutlich sehen können. Je mehr sie sich der Accommodationsanstrengung entwöhnen, desto stärkere Gläser werden nöthig. Bei verminderter Accommodationsbreite brauchen sie stärkere Convexgläser für die Nähe, schwächere für die Ferne. Die sehr bedeutenden Beschwerden der fortdauernden Accommodationsanstrengung werden durch passende Gläser ganz beseitigt, und es ist einer der bedeutendsten praktischen Triumphe der neueren Ophthalmologie, dass die äusserst hartnäckige Asthenopie, die auf Hypermetropie beruht und die die Verzweiflung der Patienten und Aerzte war, nachdem ihr Grund erkannt worden ist, durch ein so einfaches Mittel so leicht beseitigt werden kann.

1855. Stellwag v. Carion. Die Accommodationsfehler des Auges. Wiener Sitzungsber. XVI, 187.

— Czermak. Accommodationslinien. Ebenda. XV, 425, 457.

1856. A. v. Graefe. Ueber *Myopia in distans* nebst Betrachtungen über das Sehen jenseits der Grenzen unserer Accommodation. Archiv für Ophthalmol. II, 1, p. 158—186.

1857. J. J. Oppel. Ueber das Sehen durch kleine Oeffnungen und das Gerham'sche Diaskop. Jahresber. d. Frankfurter Vereins. 1856—1857. p. 37—42.

1858. F. C. Donders. Winke betreffend den Gebrauch und die Wahl der Brillen. Archiv für Ophthalmol. IV, 1, 286—300.

1859. M. Mac-Gillavry. Onderzoekingen over de hoegrootheid der accommodatie. Dissertat. Utrecht 1858. Henle u. Pfeufer. Zeitschrift für ration. Medicin. (3) VI, 612—613.

1860. F. C. Donders. Beiträge zur Kenntniss der Refractions- und Accommodations-anomalien. Archiv für Ophthalmol. VI, 1. S. 62—105. VI, 2. S. 210—283. VII, 1. p. 155—204. Verslagen en Mededeelingen der K. Acad. Amsterdam 1861. p. 159—201. Jaarlijksch Verslag betrekkelijk het Nederlandsch Gasthuis voor Ooglijders. I, 63—205. II, 25—68. IV, 1—118.

— C. Landsberg. Beschreibung eines neuen Optometers und Ophthalmodiastometers. Pogg. Ann. CX, 435—452. Polytechn. Centralbl. 1860. p. 405—406.

— A. Burow. Ueber den Einfluss peripherischer Netzhautparthien auf die Regelung der accommodativen Bewegungen des Auges. Archiv für Ophthalm. VI, 1, 106—110.

1861. Ch. Aeby. Die Accommodationsgeschwindigkeit des menschlichen Auges. Henle u. Pfeufer. Zeitschrift. (3) XI, 300—304.

— Giraud Teulon. *Des mouvemens de décentration latérale de l'appareil cristallin. C. R.* LII, 383—385. *Inst.* 1861. p. 82. *Cosmos.* XVIII, 284—286.

— H. Dor. *Des différences individuelles de la réfraction de l'oeil. J. d. la physiologie.* XI, XII. *Arch. d. sciences phys.* (2) X, 82—85.

— H. de Brieder. De stoornissen der accommodatie van het oog. Dissertat. Utrecht. — Jaarlijksch Verslag betr. het Niederl. Gasthuis. II, 69—142.

— v. Jaeger jun. Ueber die Einstellungen des dioptrischen Apparats im menschlichen Auge. Wien 1861.

— Stellwag v. Carion. Zur Litteratur der Refractions- und Accommodationsanomalien. Zeitschr d. K. K. Ges. d. Aerzte. 1861.

1862. de Haas. Geschiedkundig onderzoek omtrent de Hypermetropia en hare gevolgen. Dissert. Utrecht; Jaarlijksch Verslag betr. het Niederl. Gasthuis. III, 157—208.
1863. A. Burow. Vorläufige Notiz über die Construction eines neuen Optometers. Archiv für Ophthalmol. IX, 2, 228—231.
— Derselbe. Ein neues Optometer. Berlin. 1863.
— Derselbe. Ueber die Reihenfolge der Brillenbrennweiten. Berlin. 1864.
— A. v. Graefe. Ein Optometer. Deutsche Klinik. 1863. S. 10.
1864. F. C. Donders. *On the anomalies of accommodation and refraction of the eye.* London. p. 1—635.
1865. E. Javal. *Une nouvelle règle à calcul. Ann. d'ocul.* Bruxelles. LIII, 181.
1866. J. W. Verschoor. Optometers en Optometrie. Zesde Jaarlijksch Verslag van het Nederl. Gasthuis. voor Ooglijders. p. 97—160.

§. 12. Mechanismus der Accommodation.

Hinsichtlich der Erscheinungen, die mit dem Mechanismus der Accommodation in Verbindung stehen, ist ein Versuch von Bahr hier zu erwähnen. Derselbe betrachtete im Zustande der Accommodation ein nahes scharf beleuchtetes Rechteck, bis ein kräftiges Nachbild in seinem Auge entwickelt war, und warf dieses dann mit nachlassender Accommodation auf eine ferne Fläche, auf der er die scheinbare Grösse des Nachbildes bestimmte. Da nun die Grösse des Bildes auf der Netzhaut proportional ist dem Abstande der Netzhaut vom hinteren Knotenpunkte des Auges, und die Grösse des Netzhautbildes in beiden Beobachtungen dieselbe war, so lässt sich aus einem solchen Versuche berechnen, in welchem Verhältniss sich der Abstand der Netzhaut vom zweiten Knotenpunkte ändert. Bahr fand aus seinen Versuchen eine Verschiebung des Knotenpunkts nach vorn um 0,35 Millimeter; meine auf Seite 111 angestellte Berechnung ergiebt 0,4. Fände eine Verlängerung des Augapfels statt, so müsste die Veränderung jener Entfernung viel bedeutender sein, und wenn eine solche Verlängerung der einzige Grund der Accommodation wäre, bis zu 3 Millimeter betragen, was demnach, wie auch diese Versuche von Bahr zeigen, nicht der Fall sein kann.

Knapp[1] hat an vier individuellen Augen die Lage des Fernpunkts und Nahepunkts, die Krümmung und Lage der Hornhaut und der Linsenflächen beim Sehen für die Ferne, wie bei der Accommodation für die Nähe bestimmt und gefunden, dass die aus den Krümmungsänderungen der Krystallinse berechnete Accommodation hinreichend gut mit der wirklich stattfindenden Accommodationsbreite übereinstimmte, so dass die Annahme einer Verlängerung des Auges hierdurch ausgeschlossen war.

Donders[2] hat sich in zwei für die Untersuchung sehr günstigen Fällen, wo die Linse durch Staaroperation entfernt war, überzeugt, dass in solchen Augen, welche natürlich nur mit Hilfe einer vorgesetzten Convexlinse deutlich sehen können, keine Spur von Accommodation vorhanden ist, trotzdem bei dem Bestreben, nahe Objecte zu sehen, Convergenz und Verengerung der Pupille eintrat. Wäre eine Verlängerung des Augapfels durch den Druck der Augenmuskeln möglich, so würde eine solche auch bei Augen ohne Linse eine gewisse Breite der Accommodation bewirken können. Es bleibt nach allen diesen That-

[1] Archiv für Ophthalmol. VI, 2, p. 1—52.
[2] *On the anomalies of accommodation and refraction.* London. p. 320—321.

sachen wohl nicht zweifelhaft, dass eine Verlängerung des Augapfels bei der Accommodation für die Nähe nicht stattfindet.

Die Messung der Krümmungen der Krystallinse kann viel schärfer, als nach den oben beschriebenen Methoden, mit dem Ophthalmometer ausgeführt werden, wenn man in einer dunkeln Kammer Sonnenlicht anwendet, um die Linsenreflexe hervorzubringen, wie es B. Rosow gethan hat.

Was nun die Muskeln betrifft, welche die Formänderung der Linse hervorbringen, so ist zunächst zu bemerken, dass Fälle beobachtet worden sind, in denen die Iris wirkungslos war und doch vollständig genügende Accommodation stattfand. Ich selbst habe einen Astronomen gesehen, bei dem also optische Versuche leicht anzustellen waren und der die Erscheinungen, auf die es ankam, wohl kannte, bei welchem eine vollständige Lähmung der Iris eingetreten war und der doch vollkommen gut accommodirte. Ferner hat A. v. Graefe [1] bei einem Arbeiter, dem im Folge einer Verletzung des Auges die Iris vollständig entfernt worden war, nach der Heilung vollkommen gute Accommodation gefunden.

Es bleibt also nur der Ciliarmuskel, dem wir die Accommodation zuschreiben können. In diesem ist nun zunächst durch van Reeken, bestimmter durch H. Mueller und Rouget eine Schicht circular verlaufender Fasern entdeckt worden, welche in dem gegen die Ciliarfortsätze hin gewendeten Winkel des Muskels liegen, übrigens mit längs verlaufenden Fasern durchflochten sind, und auch vielfältig sich bogenförmig umbiegen und in Längsfasern übergehen, so dass aus dieser anatomischen Anordnung der Circularfasern zunächst wohl zu schliessen ist, dass die Circularfasern des Ciliarmuskels mit den Längsfasern desselben nur zusammen wirken können. Für die Wirkung auf die Zonula ist eine solche Anordnung der Muskelfasern offenbar sehr günstig; denn hätten wir lauter Radialfasern im Muskel, wie er in den älteren Beschreibungen geschildert wurde, so würde die nach innen sehende Ecke des Muskels eingezogen worden sein, die Zonula würde eine Ausbiegung, convex gegen den Schlemm'schen Kanal (*Taf. I, Fig. 3 s*), hin bekommen haben, und dabei viel weniger erschlafft sein als bei der bestehenden Einrichtung, wo eine solche Ausbiegung vermieden wird. Die Circularfasern des Muskels nämlich müssen die entsprechende Kante des Muskels gegen die Spitze der Ciliarfortsätze und gegen den Linsenrand hin hervorziehen und dadurch bewirken, dass auch der mittlere Theil der Zonula in Richtung ihrer Faltenränder gegen den Linsenrand verschoben wird, ohne dabei nach aussen gegen den Schlemm'schen Kanal hin gezogen zu werden.

Ob, wie H. Mueller annimmt, die Radialfasern des Ciliarmuskels einen Druck auf die Ciliarfortsätze ausüben und dieser sich fortpflanzt auf den Linsenrand, ist schwer zu beurtheilen, da wir nicht wissen, ob die Ciliarfortsätze im lebenden Auge prall genug mit Blut gefüllt sind, um einen merklichen Druck auf die Linse auszuüben, und viele Ophthalmologen es überhaupt als zweifelhaft betrachten, dass sie die Linse auch nur berühren.

W. Henke hat angenommen, dass nur die Circularfasern des Ciliarmuskels

[1] Archiv für Ophthalmologie. VII, 2, p. 150—161.

die Accommodation für die Nähe bewirken, dagegen die Längsfasern durch ihre Spannung wieder die Accommodation für die Ferne zurückführen sollen. Er betrachtet dabei die beiden Ansätze der Längsfasern des Muskels als fest, glaubt, derselbe würde bogenförmig nach innen gezogen durch die Wirkung der Ringfasern und strecke sich, wenn die Accommodation nachlässt, durch active Spannung wieder gerade, indem er die Ringfasern wieder ausdehnt. Ich halte eine solche Wirkungsweise für sehr unwahrscheinlich, erstens aus allen den Gründen, welche gegen eine active Accommodation für die Ferne sprechen, zweitens weil die Faserschichten des Ciliarmuskels zu sehr verflochten sind und sogar Längsfasern in Ringfasern und Ringfasern in Längsfasern übergehen. Dabei ist eine isolirte Wirkung der einzelnen Fasern kaum zu begreifen. Das von Henke dagegen angeführte Beispiel der Iris ist nach den neueren Untersuchungen über den *Dilatator Iridis* von sehr zweifelhaftem Werthe. Ferner scheinen mir sowohl das *Ligamentum pectinatum* als vorderer Ansatzpunkt, wie auch die Aderhaut als hinterer Ansatzpunkt des Muskels viel zu nachgiebig zu sein, um eine erhebliche Wirkung des Muskels in Henke's Sinne bei so ungünstiger Zugrichtung zuzulassen. Endlich müsste sich nach Henke's Vorstellung bei der Accommodation für die Nähe die äussere Fläche des Muskels von der Sklera abheben und bei der für die Ferne wieder anlegen. Es ist aber nicht abzusehen, wo eine Flüssigkeit herkommen soll, die den leeren Raum dieser Spalte ausfüllen könnte, und wenn eine solche nicht da wäre, würde der Luftdruck jede Nachgiebigkeit des Muskels verhindern.

Ich muss gestehen, dass mir noch immer die oben auf Seite 110 gegebene Ansicht vom Mechanismus der Accommodation am wahrscheinlichsten erscheint; Versuche, die ihre Richtigkeit zu erweisen scheinen, sind so eben von C. Völckers und V. Hensen angekündigt worden.

1855. Ruete. De Irideremia congenita. Progr. acad. Leipzig. Virchow Archiv. XII, 342.

— van Reeken. Ontleedkundig Onderzoek van den toestel voor accommodatie van het oog. Onderzoekingen gedaan in het Physiol. Laborat. der Utrecht'sche Hoogeschool. Jaar. VII, 248—286.

1856. J. P. Maunoir. *Mémoire sur l'ajustement de l'oeil aux différentes distances. Arch. des sciences phys.* XXXI, 309—316.

— Breton. *Adaptation de la vue aux différentes distances, obtenue par une compression mécanique, exercée sur le globe oculaire. C. R.* XLIII, 1161—1162. *Inst.* 1856. p. 455. *Cosmos.* IX, 690. X, 29—30.

— Goodsir. *Notice respecting recent discoveries on the adjustment of the eye to distinct vision. Proc. of Edinb. Soc.* III, 343—345. *Edinb. J.* (2) III, 339—342.

1857. Stoltz. *Accommodation artificielle ou mécanique de l'oeil à toutes les distances. C. R.* XLIV, 388—390; 618—620. *Arch. des sciences phys.* XXXV, 139. *Cimento* VI, 154—155. *Cosmos.* X, 320—321.

— Bahr. De oculi accommodatione experimenta nova. Dissertat. Berlin.

— H. Müller. Ueber einen ringförmigen Muskel am Ciliarkörper. Archiv für Ophthalm. III, 1, IV, 2. S. 277—285.

1859. J. Mannhardt. Bemerkungen über den Accommodationsmuskel und die Accommodation. Ebenda. IV, 1. S. 269—285.

— Ch. Archer. *On the adaptation of the human eye to varying distances. Phil. Mag.* (4) XVII, 224—225.

— Respighi. *Sull' accommodamento dell'occhio humano per la visione distinta. Mem. di Bologna.* VIII, 355—389. Zeitschr. für Chemie. 1859. S. 10—18.

— Magni. *Dell'addatamento dell'occhio umano alla visione distinta. Cimento* X, 12—20.

1860. J. H. Knapp. Ueber die Lage und Krümmung der Oberflächen der menschlichen

Krystallinse und den Einfluss ihrer Veränderungen bei der Accommodation auf die Dioptrik des Auges. Archiv für Ophthalmol. VI, 2, S. 1—52. VII, 2, S. 136—138.
1860. W. Henke. Der Mechanismus der Accommodation für Nähe und Ferne. Ebenda. VI, 2, S. 53—72.
— L. Happe. Die Bestimmungen des Sehbereichs und dessen Correction, nebst Erläuterungen über den Mechanismus der Accommodation. Braunschweig 1860.
1861. A. v. Graefe. Fall von acquirirter Aniridie als Beitrag zur Accommodationslehre. Archiv für Ophthalmol. VII, 2, S. 150—161.
1863. O. Becker. Lage und Function der Ciliarfortsätze im lebenden Menschenauge. Wiener Medic. Jahrbücher. 1863.
1864. E. Förster. Zur Kenntniss des Accommodationsmechanismus. Sitzungsber. d. Ophthalmol. Ges. Erlangen. S. 75—86. Klinische Monatsbl. für Augenheilk. Sept. bis Dec. 1864.
1865. B. Rosow. Zur Ophthalmometrie. Archiv für Ophthalmol. XI, 2, S. 129—134.
— Mandelstamm. Zur Ophthalmometrie. Ebenda. XI, 2, S. 259—265.

§. 13. Von der Farbenzerstreuung im Auge.

1853. L. L. Vallée. *Sur l'achromatisme de l'oeil. C. R.* XXXVI, 142—144; 480—482.
1855. Czermak. Zur Chromasie des Auges. Wiener Sitzungsber. XVII, 563.
1856. A. Fick. Einige Versuche über die chromatische Abweichung des menschlichen Auges. Archiv für Ophthalm. II, 2, 70—76.
1862. F. P. Leroux. *Expériences destinées à mettre en évidence le défaut d'achromatisme de l'oeil. Ann. de chimie.* (3) LXVI, 173—182. *Cosmos.* XX, 638—639.
— Trouessart. *Défaut d'achromatisme de l'oeil. Presse scientifique.* p. 72—74.

§. 14. Monochromatische Abweichungen.

Die hierher gehörigen Formen der Abweichungen sind seit Veröffentlichung des obigen Paragraphen im ärztlichen Interesse ausführlicher studirt worden, namentlich von Donders und Knapp. Whewell hat für sie den sehr zweckmässig gewählten Namen des Astigmatismus vorgeschlagen (*ἀ privativum* und *στίγμα* von *στίζω*, *pungo*, d. h. „ohne Brennpunkt"). Er unterscheidet regulären und irregulären Astigmatismus; ersterer umfasst die oben unter Nr. 5, Seite 140—145, beschriebenen Erscheinungen, welche davon herrühren, dass die Krümmung der brechenden Flächen des Auges, namentlich der Hornhaut in verschiedenen Meridianen verschieden ist. Der irreguläre Astigmatismus dagegen, welcher sich in den Erscheinungen der *Polyopia monocularis* äussert, umfasst diejenigen Erscheinungen, welche davon herrühren, dass auch die in jeder einzelnen Meridianebene des Auges einfallenden Strahlen nicht genau in einen Brennpunkt vereinigt werden.

Der irreguläre Astigmatismus rührt in der Regel von der Krystallinse her, wie schon oben Seite 141 gezeigt wurde, abgesehen von solchen Fällen, wo kegelförmige Erhebungen, Geschwüre und ähnliche Leiden der Hornhaut krankhafter Weise entstanden sind. Es zeigt sich dies auch darin, dass bei Augen ohne Linse die Polyopie ganz wegfällt und solche Augen die Erscheinungen des regulären Astigmatismus, namentlich die bald linienförmige, bald ovale Form der kleinen Zerstreuungskreise, wie sie auf Seite 247 abgebildet sind, viel regelmässiger und deutlicher zeigen als normale Augen.

Donders hat die Erscheinungen, welche jeder einzelne Sector der Krystallinse hervorbringt, dadurch noch genauer untersucht, dass er einen kleinen Schirm mit sehr kleiner Oeffnung vor dem Auge herumführte und so bewegte, dass das Licht bald durch den einen, bald durch den andern Sector der Linse

fiel. Es zeigte sich dabei erstens, dass jeder einzelne Sector der Linse die auffallenden Strahlen nahehin in einen Punkt vereinigt, dass aber die Brennpunkte der verschiedenen Sectoren nicht zusammenfallen. Zweitens ist aber auch die Vereinigung der Strahlen durch jeden einzelnen Sector nicht ganz genau, sondern die der Augenaxe näheren scheinen einen entfernteren Vereinigungspunkt zu haben als die peripherisch einfallenden Strahlen. Daher drängen sich in dem Zerstreuungskreise jedes Sectors die Strahlen gegen die Peripherie hin zusammen, ehe der Ort der engsten Vereinigung erreicht ist, und nachher drängen sie sich an der centralen Seite des Zerstreuungskreises zusammen.

Der reguläre Astigmatismus zeigt sich in fast allen menschlichen Augen in geringem Grade. Seine Grösse kann nach demselben Principe, wie die Breite der Accommodation gemessen werden. Astigmatische Augen haben, wie oben angeführt wurde, verschiedene Sehweite für Linien von verschiedener Richtung im Gesichtsfelde. Wenn die grösste dieser Sehweiten P ist und bei demselben unveränderten Accommodationszustande die kleinste für eine andere Linienrichtung gleich p, so brauchen wir als Maass des Astigmatismus

$$As = \frac{1}{p} - \frac{1}{P}.$$

So lange As kleiner ist als $\frac{1}{40}$, bringt es noch keine erhebliche Störung des Sehens hervor; wenn es aber grösser ist, wird die Gesichtsschärfe merklich beeinträchtigt, und es kann solchen Augen durch Brillengläser mit cylindrischen Flächen geholfen werden, deren Brennweite man der Grösse As gleich gross wählt, und deren geradlinige Cylinderkanten man, wenn die cylindrische Krümmung convex ist, der Richtung der entferntesten deutlich gesehenen Linien parallel macht. Ist die cylindrische Krümmung concav, so stellt man die Cylinderkanten im Gegentheil senkrecht zu jener Richtung. Die zweite Fläche der Cylinderlinsen kann man sphärisch schleifen, so dass die gleichzeitig etwa vorhandene Myopie oder Hypermetropie corrigirt wird.

Ein System cylindrischer Linsen ist auch das beste Mittel schnell herauszufinden, ob und wie grosser Astigmatismus vorhanden sei, und welches die Richtungen des Meridians grösster und kleinster Sehweite sind. Astigmatische Linsen mit veränderlichem Grade von Astigmatismus kann man sich nach einem Vorschlage von Stokes zusammensetzen aus zwei gleichen Cylinderlinsen, die man aufeinander legt. Stellt man sie so, dass ihre Cylinderkanten sich rechtwinkelig schneiden, so sind sie nicht astigmatisch, sondern wirken zusammen wie eine sphärische Linse. Dreht man sie unter einem kleineren oder grösseren Winkel, so kann man ihnen beliebig wachsende Grösse des Astigmatismus geben.

Einen zweckmässigen Apparat zur schnellen Messung des Astigmatismus hat E. Javal durch Herrn Nachet in Paris construiren lassen. Zwei Sterne von je 24 Linien werden durch Convexlinsen mit parallelen Gesichtslinien betrachtet. Man entfernt die Zeichnungen so weit, bis nur noch eine der Linien scharf gesehen wird. Dann werden Cylinderlinsen, die in zwei drehbaren kreuzförmigen Fassungen sitzen, entweder einzeln oder zu zweien combinirt vorgeschoben, bis man eine Stärke gefunden hat, bei der alle Linien des Sterns gleich

deutlich erscheinen. Das Centrum der beiden drehbaren Kreuze ist selbst an einem beweglichen Arme befestigt, der um die optische Axe der Convexlinse gedreht werden kann, um der Krümmung des cylindrischen Glases die richtige Richtung geben zu können.

Die von Donders und Knapp ausgeführten Messungen der Hornhaut astigmatischer Augen haben ergeben, dass mit wenigen Ausnahmen die Hornhaut den regelmässigen Astigmatismus bedingt, und dass er bei höheren Graden häufig ein wenig vermindert wird durch einen entgegengesetzten Astigmatismus der Krystallinse.

Die Richtung der Linien, für welche die Sehweite am grössten ist, ist wie in den oben angegebenen Fällen von A. Fick und mir selbst in der Regel der verticalen Richtung näher als der horizontalen; doch kommt auch, wie bei Th. Young, in nicht allzu seltenen Fällen das Umgekehrte vor.

1852. A. Müller. Ueber das Beschauen der Landschaften mit normaler und abgeänderter Augenstellung. (Angeblich von Astigmatismus herrührend.) Pogg. Ann. LXXXVI, 147—152. *Cosmos.* I, 336.
— A. Beer. Ueber den optischen Versuch des Herrn Libri. Pogg. Ann. LXXXVII, 115—120.
— J. Hippesley. *Phenomena of light. Athen.* 1852. p. 1069—1070; 1368.
— R. W. H. Hardy. *Phenomena of light.* Ebenda. p. 1306.
1853. Fechner. Ueber einige Verschiedenheiten des Sehens in verticalem und horizontalem Sinne nach verschiedenen Beobachtungen. Fechner Centralblatt. S. 73—85; 96—99; 374—379; 558—561.
— L. L. Vallée. *Théorie de l'oeil. C. R.* XXXVI, 769—773; 865—867.
— Fliedner. Zur Theorie des Sehens. Pogg. Ann. LXXXVIII, 29—44.
— H. Meyer. Ueber die sphärische Abweichung des menschlichen Auges. Ebenda LXXXIX, 540—568.
— Beer. Ueber den Hof um Kerzenflammen. Ebenda. LXXXVIII, 595—597.
— Powell. *On a peculiarity of vision. Rep. of Brit. Assoc.* 1852, 2, p. 11.
1854. J. P. Depigny. (Hof um Kerzenflammen.) *Arch. des sciences phys.* XXVI, 166—172.
— J. Gut. Ueber Doppeltsehen mit einem Auge. Henle und Pfeufer Zeitschr. (2) IV, 395—400.
1855. Ueber den Gang der Lichtstrahlen im Auge. Verhandl. der naturforsch. Ges. in Basel. I, 269—282. *Arch. des sciences phys.* XXXII, 145—146.
— H. Meyer. Ueber den die Flamme eines Lichts umgebenden Hof u. s. w. Pogg. Ann. XCVI, 235—262; 603—607; 607—609.
1856. Derselbe. Ueber die Strahlen, die ein leuchtender Punkt im Auge erzeugt. Ebenda. XCVII, 233—260. XCVIII, 214—242.
1857. van der Willigen. Eine Lichterscheinung im Auge. Pogg. Ann. CII, 175—176.
— J. Tyndall. Im *Phil. Mag.* (4) XI, 332. (Ein Fall, wo Interferenzringe im Gesichtsfelde erschienen, ähnlich denen eines mit Lycopodium bepulverten Glases.)
1858. G. M. Cavallieri. *Sulla cagione del vedere le stelle e i punti luminosi affetti da raggi. Cimento* VIII, 321—360.
1860. F. Zöllner. Beiträge zur Kenntniss der chromatischen und monochromatischen Abweichung des menschlichen Auges. Pogg. Ann. CXI, 329—336. *Ann. de chimie.* (3) LX, 506—509.
— Wharton Jones. *Analysis of my sight, with a view to ascertain the focal power of my eyes for horizontal and for vertical rays, and to determine whether they possess a power of adjustment for different distances Proc. of Roy. Soc.* X, 380—385. *Phil. Mag.* (4) XX, 480—483.
1861. Donders. Beiträge zur Kenntniss der Refractions- und Accommodationsanomalien. Arch. für Ophthalm. VII, 1, S. 155—204.
1862. J. H. Knapp. Ueber die Asymmetrie des Auges in seinen verschiedenen Meridianen. Arch. für Ophthalm. VIII, 2, S. 185—241.
— Giraud Teulon. *Causes et mécanisme de certains phénomènes de polyopie monoculaire. C. R.* LIV, 904—906; 1130—1131. *Inst.* 1862. p. 138—139; 173.
— F. C. Donders. Astigmatismus und cylindrische Gläser. Berlin.

1863. B. A. Pope. Beiträge zur Optik des Auges. Archiv für Ophthalm. IX, 1, S. 41—63.
— C. Kugel. Ueber die Wirkung schief vor das Auge gestellter sphärischer Brillengläser beim regelmässigen Astigmatismus. Ebenda. X, 1, S. 89—96.
— Middelburg. De Zidplaats van het Astigmatisme. Utrecht.
— Ph. H. Knauthe. Ueber Astigmatismus. Dissert. Leipzig.
1864. F. C. Donders. Der Sitz des Astigmatismus (nach Middelburg's Resultaten). Archiv für Ophthalm. X, 2, S. 83—108.
— J. H. Knapp. Ueber die Diagnose des irregulären Astigmatismus. Monatsbl. für Augenheilkunde. 1864. S. 304—316.
— Donders. *Anomalies of accommodation and refraction.* London. 1864. p. 449—556.
1865. L. Kugel. Ueber die Sehschärfe bei Astigmatikern. Archiv für Ophthalm. XI, 1, S. 106—113.
— H. Kaiser. Zur Theorie des Astigmatismus. Ebenda. XI, 3, S. 186—229.
— X. Galezowski. *Étude sur la diplopie monophthalmique. Ann. d'oculistique.* LIV, 199—208.
1866. E. Javal. *Sur le choix des verres cylindriques. Ann. d'oculist.* LV, p. 5—29.
— Derselbe. *Histoire et bibliographie de l'astigmatisme.* Ebenda. LV, p. 105—127.

§. 15. Die Entoptischen Erscheinungen.

Vierordt hat, wie auf Seite 382 bemerkt ist, auf hellen Flächen bei intermittirender Beleuchtung — er bewegte vor den Augen die Hand mit gespreizten Fingern hin und her — eine strömende Bewegung gesehen, die er für die Blutbewegung in den Netzhautgefässen erklärte; Meissner und ich selbst haben diese Bewegung nur in Form uferloser Strömchen gesehen, denen ich Vierordt's Deutung nicht zu geben wagte. Doch folgt daraus nicht, dass Vierordt die Erscheinung nicht deutlicher und bestimmter gesehen haben kann, und dass es nicht wirklich bei ihm ein Ausdruck des Blutlaufs war.

Ausserdem hatten Purkinje und J. Müller (siehe oben Seite 424 bis 426), wenn sie nach einer ausgedehnten hellen Fläche blickten, helle Punkte im Gesichtsfelde erscheinen und eine Strecke fortlaufen sehen, so dass dieselben nach unregelmässigen Pausen immer wieder an denselben Stellen auftauchen und immer wieder denselben Weg mit derselben ziemlich grossen Geschwindigkeit zurücklegen. Diese Erscheinung sieht man nun nach einer Bemerkung von O. N. Rood sehr viel besser, wenn man durch ein dunkles blaues Glas nach dem Himmel sieht. Ich fixire dabei einen Punkt der Fensterscheibe, um die bewegten Körperchen immer wieder an derselben Stelle zu sehen und die Lage ihrer Bahnen mit der auf dieselbe Fensterscheibe projicirten Gefässfigur zu vergleichen.

Nachdem ich diese Beobachtungen wiederholt habe, glaube ich nun ebenfalls nicht mehr zweifeln zu können, dass sie von der Blutbewegung herrühren, und zwar so, dass ein einzelnes grösseres Körperchen sich in einem der engeren Gefässe klemmt. Dann pflegt vor einem solchen das Gefäss relativ leer zu werden, hinter ihm dagegen stauen sich die Blutkörperchen in grösserer Menge an. Sobald das Hemmniss sich löst, strömt der ganze Haufen schnell davon. Es sind dies Vorgänge, die man bei Beobachtung des Capillarkreislaufes mit dem Mikroskope oft sieht. Bei dem genannten Versuche geht im Sehfelde voran ein hellerer länglicher Streifen, entsprechend der leeren Stelle des Gefässes vor dem Hemmniss; diesem folgt ein dunklerer Schatten, der, wie ich glaube, den zusammengedrängten Blutkörperchen entspricht.

In meinem rechten Auge sehe ich diese Erscheinung in zwei parallelen Gefässchen links neben dem Fixationspunkt sehr deutlich und oft sich wiederho-

len, zuweilen in beiden gleichzeitig; die Bewegung ist scheinbar nach oben gerichtet und das bewegte Gebilde verschwindet, indem es sich mit beträchtlich gesteigerter Geschwindigkeit durch eine *S*förmige Krümmung hindurchwindet. Nun finde ich im entoptischen Bilde des Gefässbaums sowohl die beiden parallelen Gefässe an der angegebenen Stelle, als auch die *S*förmige Krümmung ihrer Vereinigungsstelle, welche in ein grösseres Venenstämmchen hinüberführt, so dass beide Beobachtungsmethoden sich vollständig entsprechen. Uebrigens sind die genannten Gefässe nicht die einzigen, in denen eine solche Bewegung sichtbar wird, sondern es giebt noch viele andere Stellen in dem Sehfelde desselben Auges, die aber weiter vom Fixationspunkte abliegen und nicht so charakteristische Formen haben.

Danach würde die genannte Erscheinung also als der optische Ausdruck kleiner Hemmungen des Blutlaufs zu betrachten sein, die nur in gewissen Engpässen des Gefässbaums und nur beim Vorübergang etwas grösserer Körperchen aufzutreten pflegen.

1853. Trouessart. *Suite des recherches concernant la vision. C. R.* XXXVI, 144—146.
1856. Vierordt. Wahrnehmung des Blutlaufs in den Netzhautgefässen. Archiv für physiol. Heilkunde. 1856. Heft II.
— Meissner. Im Jahresbericht für 1856. Henle und Pfeufer Zeitschr. (3) I, 565—566.
1857. J. Jago. *Ocular spectres, structures and functions as mutual exponents. Proc Roy. Soc.* VIII, 603—610. *Phil. Mag.* (4) XV, 545—550.
1860. O. N. Rood. *On a probable means of rendering visible the circulation in the eye. Silliman J.* (2) XXX, 264—265; 385—386.
1861. L. Reuben. *On normal quasi-vision of the moving blood-corpuscles within the retina of the human eye. Silliman J.* (2) XXXI, 325—388; 417.

§. 16. Das Augenleuchten und der Augenspiegel.

Die Form des Augenspiegels, die sich schliesslich am Allgemeinsten bei den Augenärzten eingebürgert hat, ist der oben beschriebenen Form des Coccius'schen oder Zehender'schen Spiegels am ähnlichsten, nur mit der Aenderung, dass an Stelle des ebenen oder convexen Spiegels mit einer beleuchtenden Convexlinse, wie sie jene Instrumente haben, ein concaver Spiegel ohne Convexlinse getreten ist, von 5—6 Zoll Brennweite, 1 Zoll Durchmesser. Die Spiegel werden bald von Metall gemacht, was den Vortheil einer reineren Oeffnung mit scharfen, nicht reflectirenden Rändern giebt; oder es sind belegte Glasspiegel, in der Mitte durchbohrt. Bei diesen letzteren ist die Spiegelfläche besser vor Verletzung geschützt, und sie sind auch meist heller als gewöhnliche Metallspiegel. Ein Nachtheil aber ist es, namentlich für die Beleuchtung im aufrechten Bilde, dass der Rand zwischen der spiegelnden Fläche und der Oeffnung nicht so schmal und scharf gemacht werden kann, wie bei den Metallspiegeln.

Die Beobachtung des eigenen Augenhintergrundes nach Coccius ist auf Seite 211 beschrieben worden; es genügt dazu jeder durchbohrte, am besten ein convexer Spiegel. Ein anderes Autophthalmoskop, in welchem das linke Auge nach der beleuchteten Netzhaut des rechten Auges hinsieht, ist von F. Heymann beschrieben worden. Durch die Oeffnung eines durchbohrten Planspiegels fällt Licht in das rechte Auge; das linke blickt in Richtung der Oeff-

nung jenes Spiegels, in welcher Richtung es ein Spiegelbild des rechten Auges sieht. Vor das rechte Auge ist, wie in Ruete's Spiegel eine Convexlinse ($2\frac{1}{4}$ Zoll Brennweite) gesetzt, in deren Brennpunkt die Pupille jenes Auges sich befindet. Dieselbe entwirft zugleich ein umgekehrtes Bild der Netzhaut in ihrem Brennpunkte. Nahe diesem Bilde ist ein reflectirendes rechtwinkeliges Prisma aufgestellt, um die Strahlen gegen den durchbohrten Spiegel hinzulenken. Eine zweite Convexlinse, die zwischen Prisma und Spiegel, sowie eine dritte, welche vor dem linken Auge steht, bilden eine Art gebrochenen kleinen Fernrohrs, durch welches das beobachtende linke Auge das Netzhautbild sieht, und durch welches auch gleichzeitig beiden Augen die Accommodation für das Loch im Spiegel unmöglich gemacht wird.

Um die beobachtete Netzhautstelle wechseln zu können, schiebt Heymann noch ein prismatisches Brillenglas von verschiedener Stärke, dessen brechende Kante nach verschiedenen Richtungen hin gewendet werden kann, vor das beobachtende Auge.

Der binoculare Augenspiegel von Giraud Teulon ist beschrieben auf Seite 641.

1855. E. Jaeger. Beiträge zur Pathologie des Auges mit Abbildungen in Farbendruck. Wien.
— Derselbe. Ergebnisse der Untersuchung des menschlichen Auges mit dem Augenspiegel. Wien. Ber. XV, 319—344.
1856. Casterani. Ophthalmoscope. *Cosmos.* VIII, 612.
— W. Zehender. Ueber die Beleuchtung des inneren Auges durch heterocentrische Glasspiegel. Archiv für Ophthalm. II, 2, S. 103—130.
1857. J. Porro. *La lunette panfocale, employée comme ophthalmoscope. C. R.* XLV, 103—104. *Cosmos.* XI, 96—97.
— A. Burow. Ueber Construction heterocentrischer Augenspiegel und deren Anwendung. Archiv für Ophthalm. III, 2, 68—80.
— Schneller. Ein Mikrometer am Augenspiegel. Ebenda. III, 2, S. 121—186.
— R. Liebreich. *De l'examen de l'oeil au moyen de l'ophthalmoscope. Bruxelles (Extrait de la traduction du Traité pratique des maladies des yeux par* Mackenzie).
1859. A. Zander. Der Augenspiegel, seine Formen und sein Gebrauch. Leipzig u. Heidelberg.
1861. O. Becker. Ueber Wahrnehmung eines Reflexbildes im eigenen Auge. Wiener Med. Wochenschrift 1860. p. 670—672; 684—688. (Bildchen der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut nach hinten reflectirt).
1863. Burow jun. Notiz betreffend die Beobachtung des eigenen Augenhintergrundes. Archiv für Ophthalmol. IX, 1, S. 155—160.
— F. Heymann. Die Autoskopie des Auges. Leipzig.
— R. Liebreich. Atlas der Ophthalmoskopie. Berlin, Hirschwald.
1864. C. Schweigger. Vorlesungen über den Gebrauch des Augenspiegels. Berlin,
— A. Coccius. Beschreibung eines Oculars zum Augenspiegel. Archiv für Ophthalm. X, 1, S. 123—147.
— R. Schirmer. Ueber das ophthalmoskopische Bild der Macula lutea. Ebenda. X, 1, p. 148—151.
— Wintrich. Ueber die Benutzung des zweckmässig abgeblendeten zerstreuten Tageslichts zur Oto-, Ophthalmo- und Laryngoskopie. Erlanger Medic. Neuigkeiten. 1864, 9. April.

§. 17. Von der Reizung des Sehnervenapparats.

Auf Seite 205 ist darauf aufmerksam gemacht worden, dass die Wirkungen constanter elektrischer Ströme auf den Sehnervenapparat nicht, wie es bis dahin geschehen war, als Reizung, sondern als Veränderungen der Reizempfänglichkeit durch den elektrotonischen Zustand aufzufassen seien. Aber die Annahme, welche

ich dort gemacht habe, dass die dauernde innere Erregung der Sehnervenfasern, für welche die Empfindlichkeit gesteigert werde, am Hirnende des Nerven stattfinde, passt nicht zu den Erscheinungen, welche bei der Einströmung der Elektricität durch einen schmalen Zuleiter unmittelbar in den Augapfel selbst auftreten und die auf Seite 206 schon theilweise nach Purkinje beschrieben sind. Es ist aus diesen vielmehr zu schliessen, dass es die Radialfasern der Netzhaut sind, deren elektrotonischer Zustand zur Erscheinung kommt, und dass die constante Erregung derselben an der hinteren Fläche der Netzhaut stattfindet.

Legt man die negative Elektrode im Nacken an und benutzt als positive Elektrode ein kegelförmig zugespitztes und mit Salzwasser getränktes Stück Schwamm, was an einem Stiel von Metall befestigt ist und nahe am äusseren Augenwinkel an die wohlbefeuchteten Augenlider mit seiner Spitze angelegt wird, so erscheint das Gesichtsfeld nach der Nasenseite hin dunkel, auf der Schläfenseite hell; die Eintrittsstelle des Sehnerven, welche in den hellen Theil fällt, erscheint dunkel. Wendet man das Auge so, dass der Fixationspunkt an die Grenze des hellen und dunklen Theils fällt, so erscheint von ihm aus ein helles Lichtbüschel gegen den dunklen Theil, ein dunkles Büschel gegen den hellen Theil des Gesichtsfeldes gekehrt. Diese beiden oval abgegrenzten Büschel bedecken etwa die Ausdehnung des gelben Flecks.

Kehrt man die Stromesrichtung um, so vertauschen sich Hell und Dunkel der ganzen Erscheinung. Wie Umkehr der Stromesrichtung wirkt für einen Augenblick auch Unterbrechung des Stroms.

Alle diese Erscheinungen erklären sich einfach aus dem elektrotonischen Zustande der radial verlaufenden Nervenbahnen der Netzhaut, wenn man annimmt, dass an ihrem hinteren Ende eine fortdauernde schwache Reizung durch innere Ursachen unterhalten werde, wie eine solche sich in dem Eigenlicht der Netzhaut zu erkennen giebt.

Wenn die positive Elektricität auf der äusseren Seite des Auges in den Augapfel einströmt, an der inneren und hinteren Seite wieder ausströmt, so wird die Erregbarkeit der Netzhaut an ihrer hinteren Fläche dort geschwächt, hier vermehrt werden; daher die innere Hälfte des Sehfeldes, welche der äusseren Netzhauthälfte entspricht, dunkel, die äussere Hälfte desselben hell erscheinen muss. Der Sehnerv wirkt wahrscheinlich als schlecht leitende Masse und schwächt den Strom nahe seiner Eintrittsstelle, daher diese sich durch entgegengesetzte Beleuchtung vor ihrem Grunde auszeichnet. Steht der gelbe Fleck an der Grenze der entgegengesetzt durchströmten Netzhauttheile, so geht in ihm die Strömung nach der Flächenrichtung der Netzhaut. Im gelben Fleck haben wir aber auch in der Fläche der Membran verlaufende Faserbündel. Diese werden also von der positiven Elektricität in der Richtung von der Schläfe nach der Nase durchflossen, das heisst, die Fasern an der Schläfenseite der Netzhautgrube werden durchflossen in der Richtung gegen ihr mit den Zapfen in Verbindung stehendes Ende hin, die an der Nasenseite der Netzhautgrube von diesem Ende weg. In jenen wird die Erregung gesteigert, in diesen vermindert; daher das helle Büschel auf der Nasenseite des Fixationspunktes im Gesichtsfelde, das dunkle Büschel auf seiner Schläfenseite.

Aendert man die Eintrittstelle des Stroms, so verschiebt sich die ganze Erscheinung entsprechend.

1858. J. Czermak. Ueber das Accommodationsphosphen. Wiener Ber. XXVII, 78—86. Archiv für Ophthalmologie. VII, 1, p. 147—154.
1863. R. Schelske. Ueber Farbenempfindungen. Archiv für Ophthalmol. IX, (3) S. 39—62.
1864. Aubert. Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 333—390.

§. 18. Von der Reizung durch Licht.

Herr A. Volkmann hat neue Versuche veröffentlicht, aus denen er schliesst, dass die Zapfen der Netzhautgrube nicht fein genug seien, um die wirklich stattfindende Sehschärfe des menschlichen Auges zu erklären. Die Hauptversuche sind mit zwei feinen Drähten ausgeführt, die vor hellem Grunde ausgespannt waren und mittels einer Mikrometerschraube so weit einander genähert werden konnten, bis der Zwischenraum zwischen ihnen dem Auge verschwand. Volkmann betrachtete diesen Zwischenraum als das kleinste sichtbare Object, und zog von seiner wirklichen Breite noch die Irradiationssäume ab, durch welche die Breite der Drähte scheinbar vergrössert wird. Dadurch erhielt er ausserordentlich kleine Werthe für die kleinsten Bilder, welche sehr viel kleiner erschienen als die Zapfen der Netzhaut. Ich muss ihm gegenüber aber festhalten, was ich oben auf Seite 217 auseinandergesetzt habe, dass aus derlei Versuchen nicht folgt, dass die empfindenden Elemente der Netzhaut kleiner als das Bild des Zwischenraums der Fäden seien, sondern nur, dass sie kleiner seien als die Distanz von der Mitte des einen dunklen Streifen bis zur Mitte des andern; und die letzteren Distanzen sind auch bei Volkmann's Versuchen nicht merklich kleiner, als sie früher von andern Beobachtern immer gefunden worden sind.

Herr Dr. Hirschmann hat die Versuche mit Systemen paralleler Drähte, wie sie oben S. 218 und 219 beschrieben sind, mit vielen Variationen wiederholt, um die günstigsten Bedingungen herauszufinden, und ist dabei ebenfalls bis zu Werthen von etwa 50 Secunden Gesichtswinkel gekommen, welches auf der Netzhaut einer Breite von 0,00365 Millimeter entspricht. Nun ist aber nach den neuesten Messungen der Durchmesser der Zapfen in der Netzhautgrube,

nach M. Schultze	0,0020 bis 0,0025
nach H. Müller	0,0015 bis 0,0020
nach Welcker	0,0031 bis 0,0036.

Die Zapfen wären hiernach also fein genug, um der Genauigkeit der genannten Wahrnehmungen zu entsprechen.

Bei anderen Versuchen hat Volkmann Buchstaben, Ziffern und andere Formen von Objecten betrachtet und sucht es wahrscheinlich zu machen, dass die Anzahl der Zapfen, auf welche das Bild dieser Objecte fällt, nicht gross genug sei, um die betreffenden Formen unterscheiden zu können. Dabei scheint mir aber noch in Betracht zu kommen, dass wenn das Auge sich bewegt, das Bild eines Buchstaben sich nach einander auf verschiedenen Gruppen von Zapfen und in relativ verschiedener Lage zu den einzelnen Zapfen abbilden kann, und dass Unterschiede, die in der einen Lage des Bildes vielleicht verschwinden, in einer andern deutlich werden können.

Ich glaube deshalb nicht, dass wir gezwungen sind die Ansicht, dass die Zapfen der Netzhaut die empfindenden Elemente seien, aufzugeben. Andererseits kann nach den neuesten Beobachtungen von M. Schultze in Betracht kommen, dass die gegen die Aderhaut gewendeten und durch schwarzes Pigment von einander getrennten, stabförmigen Enden der Zapfen des gelben Flecks nur 0,00066 Mm. messen, und sie vielleicht allein, nicht die ganzen Zapfen die empfindlichen Elemente sind.

Die ärztlichen Bestimmungen der Sehschärfe werden in der Regel mit Buchstaben von verschiedener Grösse ausgeführt, welche man aus grösserer Entfernung und mit passender Unterstützung der Accommodation durch Brillengläser betrachten lässt. Als Maass der Sehschärfe eines Auges benutzt man einen Bruch, dessen Zähler der Abstand ist, in welchem jene Buchstaben noch gelesen werden konnten, dessen Nenner dagegen die Entfernung ist, aus der sie unter einem Winkel von 5 Winkelminuten erscheinen. Die letzteren Entfernungen sind bei Buchstabenproben, welche Snellen veröffentlicht hat, schon angegeben.

Im Durchschnitt findet sich nach Vroesom de Haan diese Genauigkeit im 10. Lebensjahre gleich 1,1, im 40. gleich 1,0, im 80. gleich 0,5 und nimmt überhaupt mit steigendem Lebensalter continuirlich ab.

Nach den Beobachtungen von E. Javal ist aber bei Correction des Astigmatismus und guter Beleuchtung (gleich der von 500 Kerzen in 1 Meter Entfernung) die Genauigkeit des Sehens um $^1/_4$ bis $^1/_3$ grösser, als de Haan angab.

1854. Bergmann. Zur Kenntniss des gelben Flecks der Netzhaut. Henle und Pfeufer Zeitschr. (2) 245—252.
1855. Budge. Beobachtungen über die blinde Stelle der Netzhaut. Verhandl. des naturhist. Vereins d. Rheinlande. 1855. S. XLI.
1860. G. Braun. Notiz zur Anatomie der Stäbchenschicht der Netzhaut. Wien. Ber. XLII, S. 15—19.
— G. M. Cavallieri. *Sul punto cieco dell' occhio. Atti dell' Istituto Lombardo.* II, 89—91.
1861. H. Müller. Bemerkungen über die Zapfen am gelben Fleck des Menschen. Würzburger Zeitschrift für Naturk. II, 218—221.
1862. H. Snellen. Letterproeven ter bepaling der gezigtsscherpte. Utrecht.
— J. Vroesom de Haan. Onderzoek naar den invloed van den leeftijd op de gezigtsscherpte. Utrecht.
— A. W. Volkmann. Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig. Heft 1, S. 65.
1863. Wittich. Studien über den blinden Fleck. Archiv für Ophthalm. IX, 3, S. 1—38.
— K. Vierordt. Ueber die Messung der Sehschärfe. Ebenda. S. 219—223.
1864. Aubert. Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 187—251.
— W. Zehender. Historische Notiz zur Lehre vom blinden Fleck. Archiv für Ophthalm. X, 1, S. 152—155.
— O. Funke. Zur Lehre von den Empfindungskreisen der Netzhaut. Bericht der naturforsch. Ges. zu Freiburg i. Br. III, S. 89—116.
— Donders. *Anomalies of accommodation and refraction.* London. p. 188—203.

§. 19. Die einfachen Farben.

Ueber die Durchstrahlbarkeit der Augenmedien für Wärme liegen neue Versuche von J. Janssen und R. Franz vor. Beide fanden die Absorptionskraft der Augenmedien für Wärmestrahlen verschiedener Art, namentlich auch für dunkle Strahlen der des Wassers sehr ähnlich. Nur die Hornhaut und Krystallinse scheinen nach Franz von den rothen Strahlen etwas mehr zu absorbiren

als Wasser. Beide Beobachter schliessen aus ihren Versuchen, dass Wärmestrahlen in merklicher Menge zur Netzhaut gelangen können, und dass der Grund, warum wir sie nicht empfinden, nicht in der Absorption der Strahlen, sondern in der Unempfindlichkeit der Netzhaut liege.

1856. G. Wilson. *On the transmission of actinic rays of light through the eye and their relation to the yellow spot of the retina. Proc. of Edinb. Soc.* III, 371—375. *Edinb. J.* (2) IV, 147—149.

1858. J. Regnauld. *Fluorescence des milieux de l'oeil. Inst.* 1858. p. 410.

1859. J. Setschenow. Ueber die Fluorescenz der durchsichtigen Augenmedien. Archiv für Ophthalm. V, 2, S. 205—209.

— J. Smith. *On the cause of colour and the theory of light. Rep. of Brit. Assoc.* 1859. (2) p. 22—23. *Proc. of Manchester Phil. Soc.* 1859—1860. p. 147—149. *Athen.* 1859. (2) p. 434.

1860. J. Regnauld. *Étude sur la fluorescence des milieux transparents de l'oeil. Cosmos.* XVI, 88—90. *Journ. de Pharm.* (3) XXXVII, 104—111.

— J. Janssen. *Sur l'absorption de la chaleur rayonnante obscure dans les milieux de l'oeil. C. R.* LI, 128—131, 373—374. *Ann. de chim.* (3) XL, 71—93. *Journ. de pharm.* (3) XXXVIII, 189—192. *Cosmos.* XVII, 139—140. *Cimento* XII, 132—133.

1862. R. Franz. Ueber die Diathermansie der Medien des Auges. Pogg. Ann. CXV, 266—279. *Phil. Mag.* (4) XXIV, 176—185. *Arch. des sciences phys.* (2) XVI, 140—141. *Cimento* XVII, 27.

§. 20. Die zusammengesetzten Farben.

Cl. Maxwell hat eine wichtige Reihe von Versuchen über Mischung der Spectralfarben angestellt, um die Farbentöne der drei Grundfarben und die Form der drei Intensitätscurven *Fig. 119* Seite 201 zu bestimmen, welche nach Th. Young's Theorie die Stärke der einzelnen Grundfarben für jede Stelle des Spectrum ausdrücken. Er liess zu dem Ende weisses Licht durch drei Spalten, deren Weite und Stellung geändert werden konnte, in einen dunklen Kasten treten. Das Licht ging dann durch zwei Prismen und wurde durch eine Linse auf einen Schirm vereinigt, wo es demnach drei theilweis sich deckende prismatische Spectra bildete. Ein Spalt in diesem Schirm liess eine der Mischfarben austreten, um in das Auge des Beobachters zu fallen. Der letztere, durch den Spalt blickend, sah vor sich die Fläche der Linse gleichmässig bedeckt mit der betreffenden Mischfarbe. Durch eine andre Abtheilung des Kastens fiel von demselben weissen Lichte ein, ohne durch ein Prisma zu gehen. Durch einen passend angebrachten Spiegel von schwarzem Glase wurde dieses Weiss dem Beobachter ebenfalls zugelenkt, und dieser erblickte es als ein weisses Feld dicht neben der Linse. Seine Aufgabe bestand darin, die Stellung und Weite der drei Spalten, welche das prismatisch zerlegte Licht lieferten, so lange zu ändern, bis die Mischfarbe der drei prismatischen Farben dem unverändert gespiegelten Weiss genau gleich aussah.

Eine bequemere Form gab Maxwell dem Instrumente später dadurch, dass er das durch die Prismen gegangene Licht von einem Concavspiegel wieder durch die Prismen zurückwerfen liess. Dadurch wird das Ganze kürzer und der Beobachter kommt dicht neben die Schlitze zu sitzen, so dass er diese selbst einstellen kann, was ein grosser Vortheil ist.

Maxwell brauchte als Grundfarben 1. ein Roth zwischen den Frauenhofer'schen Linien C und D, von letztrer doppelt so weit entfernt, als von ersterer.

Es wäre dies nach unseren oben festgesetzten Farbenbezeichnungen Scharlachroth übergehend nach Orange. 2. ein Grün nahe der Linie *E*. 3. ein Blau zwischen *F* und *G*, von letzterem doppelt so weit entfernt, als von ersterem; etwa auf dem Uebergang von Cyanblau zu Indigblau.

Aus diesen dreien wurde während einer Beobachtungsreihe von Zeit zu Zeit immer wieder Weiss zusammengesetzt und die Breite der Spalten, die dazu nöthig war, notirt, um dadurch die unveränderte Mischung des normalen weissen Lichts zu constatiren. Durch die Breite der Spalten wurde die Quantität des hierbei nöthigen Lichts gemessen. Dazwischen wurde dann aus je zweien der Grundfarben und einer beliebig gewählten dritten Farbe Weiss zusammengesetzt und der Ort der dritten Farbe im Spectrum nach einer neben den drei Spalten angebrachten Scala, so wie die Breite der Spalten notirt.

War das Weiss hinreichend unverändert geblieben, so erhielt man auf diese Weise eine Reihe von Farbengleichungen, aus denen der Ort der beobachteten Spectralfarben in einer Farbentafel bestimmt werden konnte, nachdem der Ort der gewählten drei Grundfarben in derselben willkührlich festgesetzt war. Auf diese Weise erhält man nach wirklichen Beobachtungen die Form der Curve der *Fig. 120* Seite 293, welche ich dort nach blosser Schätzung entworfen habe. Die von Maxwell so entworfenen Curven für zwei Beobachter schliessen sich der Umfangslinie des Dreiecks *ARV* sehr viel näher an, als es in *Fig. 120* der Fall ist, so dass die Curve zwei fast geradlinige Theile erhält. Ihre am meisten hervorspringenden Biegungen, die also den Ecken des vollständigen Farbendreiecks am nächsten zu kommen scheinen, entsprechen etwa den drei oben genannten Grundfarben. Doch müsste nach den Beobachtungen des ersten Beobachters das Blau, nach denen des zweiten das Roth etwas mehr gegen das Ende des Spectrum hin genommen werden. Aber gerade für die lichtschwachen äussersten Farben des Spectrum hatte die Beobachtung Schwierigkeit.

Abweichend von der *Fig. 120* ist es in Maxwell's Projectionen ferner, dass die Farbencurve mit ihren beiden Enden in Roth und Violett sich der dritten Seite des Dreiecks anzulegen scheint.

Maxwell's Resultat widerspricht einigermassen meinem auf Seite 279 angegebenen und durch directen Versuch gewonnenen Satze, dass die Mischung zweier Spectralfarben immer etwas weisslicher ist, als die einfache Spectralfarbe, die jener Mischfarbe im Farbenton am nächsten kommt. Daraus würde folgen, dass die Farbencurve nirgends gerade Strecken enthalten kann; denn die Farben, die auf einer geraden Linie liegen, können durch gegenseitige Mischung aus einander gewonnen werden. Dieser Widerspruch mag sich daraus erklären, dass gerade an den Grenzen des Farbendreiecks die Farbentöne sich relativ am schnellsten ändern müssen, und dass deshalb, wenn auch seine Seiten eine nur sehr schwache Convexität, die bei Maxwell's indirecterer Untersuchungsmethode nicht bestimmt zum Vorschein kommt, haben, und ihre Sehne deshalb dem Bogen sehr nahe liegt, doch auf der Sehne schon merklich anders aussehende Farben liegen können, als auf dem Bogen.

Maxwell hat ferner aus seinen Versuchen berechnet, in welcher Stärke die drei von ihm gewählten Grundfarben in den einzelnen prismatischen Farben

vorhanden sind und danach die Curven construirt, die ich in *Fig. 119* schematisch angegeben habe. Seine Curven haben etwas spitzere Gipfel als die der *Fig. 119*, und die des Roth steigt wieder am violetten Ende, die des Blau am rothen Ende des Spectrum ein wenig.

Es wäre wohl noch zu wünschen, dass durch ähnliche Versuche, wie MAXWELL's, untersucht würde, ob man aus gelblichem Grün und Goldgelb wirklich ganz genau spectrales Gelb, aus äusserstem Roth und Indigblau wirklich genau das spectrale Violett u. s. w. zusammensetzen kann, um danach die Form der Grenzen der spectralen Farbentafel noch directer zu bestimmen. Zu bemerken ist, dass die beiden Beobachter bei MAXWELL ihre Mischungen aus Spectralfarben nicht ganz gleich zusammensetzten, um sie dem Weiss gleich zu machen, und dass jeder von ihnen die Mischungen, welche der andere gemacht hatte, nicht als vollkommenes Weiss anerkannte. Auch zeigte die Curve der Helligkeiten bei dem zweiten Beobachter (MAXWELL selbst) in der Gegend der Linie *F* eine stärkere Vertiefung, als bei dem ersten. MAXWELL macht es wahrscheinlich, dass daran die verschiedene Intensität der Pigmentirung des gelben Flecks Schuld sei, da das gelbe Pigment (s. Seite 420) namentlich das Licht der Linie *F* zu absorbiren scheint. Deshalb erscheinen weisse Mischfarben, die jenes Blau enthalten, auch im indirecten Sehen nicht mehr weiss, wass ich selbst ebenfalls schon früher bemerkt hatte (s. Seite 305).

Da die prismatischen Farben also bei verschiedenen Individuen durch verschieden intensive Schichten gelbgefärbter Substanz gerade zu den mittleren Theilen der Netzhaut dringen müssen, so wird ihre Stärke dadurch verschieden geändert, und die von zwei Individuen entworfenen Farbendreiecke zeigen Abweichungen in der Vertheilung der Farben, wie sie dadurch entstehen können, dass man die (übrigens willkührlich festzusetzenden) Helligkeitseinheiten der drei Grundfarben verändert. So wirkt in MAXWELL's eigenen Augen das Roth relativ stärker, das Blau relativ schwächer, als in denen des andern Beobachters.

Auch die Farbenempfindungen, welche constante elektrische Ströme hervorbringen, lassen sich nach SCHELSKE mit objectiven Farben zusammensetzen und geben ähnliche Resultate. Der aufsteigende Strom mischt den gesehenen äusseren Farben bläulich violettes Licht zu, der absteigende Strom entzieht ihnen eine Quantität dieser Farbe. Es lassen sich sogar Farbengleichungen herstellen für zwei Farbenscheiben, deren eine sich auf einer aufsteigend durchflossenen Netzhauthälfte abbildet, die andere auf einer absteigend durchflossenen.

Die oben auf Seite 300 erwähnte Rothblindheit an der Grenze des Sehfeldes hat SCHELSKE näher studirt, indem er Farbengleichungen für die peripherischen Theile der Netzhaut herstellte zwischen Gelb und Blau einerseits, andrerseits Roth, oder Grau, oder Grün. Von den Spectralfarben erschien die Gegend der Linie *F* fast weiss, die brechbareren blau, Violett dunkelblau, die weniger brechbaren grün, das äusserste Roth sehr schwach und farblos, graulich.

Dass farbenblinde Personen alle Farben für ihr Auge aus je zwei Grundfarben zusammensetzen können, ist durch viele Beobachter constatirt worden. Zu einer genaueren Feststellung der fehlenden Grundfarbe haben diese Versuche aber noch nicht geführt, weil die Versuche mit Farbenscheiben, zu verschiedenen

Zeiten und mit verschiedenen Individuen angestellt, ziemlich veränderliche Resultate geben. Einmal hat der Wechsel der äusseren Beleuchtung, das von den gefärbten Zimmerwänden oder anderen Objecten reflectirte Licht sehr grossen Einfluss, wie ausser MAXWELL auch E. ROSE hervorgehoben hat. Dann bringt die Pigmentirung des gelben Flecks bei Farbenblinden natürlich eben solche Differenzen hervor, wie sie MAXWELL bei Gesunden nachgewiesen hat. Bei der Beobachtung an Farbenscheiben, wo man Pigmentfarben benutzt, wird aber durch solche Absorption in dem gelben Pigment nicht blos die Helligkeit dieser Farben, sondern auch ihre Mischung geändert, sie erhalten also, wenn man die zwei wirklichen Grundfarben und den Punkt des Schwarz in dem Farbendreieck feststellt, verschiedene Lage nach der Intensität der Pigmentirung des Auges. Wenn man aber drei solchen Pigmentfarben als Grundfarben im Farbendreieck constante Lage giebt, so bekommen umgekehrt die wirklichen Grundfarben und das Schwarz verschiedene Lage für verschiedene Individuen. Solche Verschiedenheiten in der Lage des Schwarz hat nun E. ROSE beobachtet bei Farbenblinden, auch wenn er sie gleichzeitig und unter übrigens gleichen äusseren Verhältnissen beobachtete, und daraus gefolgert, dass die Theorie von TH. YOUNG nicht richtig sein könne. Indessen scheinen sich die vermeintlichen Widersprüche einfach aus den angegebenen Verhältnissen erklären zu lassen. Dies wird bestätigt durch ROSE's Bemerkung, dass zu constanten Gleichungen nur zu kommen war, wenn die Farbenblinden immer denselben Punkt der Scheibe fixirten; jede Aenderung des Fixationspunktes veränderte bei vielen von ihnen die Farbengleichung. Es zeigt sich hierbei die Verschiedenheit, welche die Pigmentirung in der Farbenempfindung verschiedener Theile derselben Netzhaut hervorbringt.

Daneben kommen nun auch Fälle unvollkommener Farbenblindheit vor, wie sie Herr GLADSTONE an sich beschreibt und wie sie auch von Herrn Dr. HIRSCHMANN in meinem Laboratorium an einem Studirenden gefunden worden ist. Dabei wird die Einmischung ziemlich grosser Quantitäten von Roth in eine Farbe nicht bemerkt. Uebersteigt aber die Menge des Roth eine gewisse Grenze, so wird es wahrgenommen. Wird dies übersehen und betrachtet man ein solches Auge als ganz rothblind, so werden seine Farbengleichungen natürlich auch nicht genau mit den theoretischen Forderungen stimmen können.

Die von E. ROSE bei Tageslicht angestellten Beobachtungen ergeben übereinstimmend mit MAXWELL's und meinen Beobachtungen den schwarzen Punkt in der Nähe des Scharlachroth, etwas nach dessen blauer Seite hinüber. Die meisten Beobachtungen aber hat E. ROSE wohl nicht ganz zweckmässig bei künstlicher Beleuchtung mit Photogen angestellt, welche relativ arm an Blau ist, und wo gerade der Gehalt an Blau nach der bei wechselndem Luftzuge wechselnden Temperatur der Flamme verhältnissmässig am meisten variirt. Da nun hierbei den Farbenblinden die Empfindung des Roth fehlt, Blau sehr wenig und in schwankender Menge in der Beleuchtung enthalten ist, noch dazu das brechbarere Blau, welches am meisten der Absorption in dem Pigment des gelben Blicks unterworfen ist und also bei solcher Beleuchtung in allen Farben für die Rothblinden Grün bei weitem überwiegen muss, so dürfen wir uns nicht

wundern, wenn unter diesen Umständen die von verschiedenen farbenblinden Beobachtern gefundenen Farbengleichungen selbst an einem und demselben Abend nicht gut übereinstimmen. Ihre Punkte für Schwarz liegen in dem Farbendreieck alle zwischen Blau und Roth, aber, wie es durch die Schwäche des Blau bedingt wird, dem Blau näher, als bei Tagesbeleuchtung.

Es sind die Beobachtungen von E. Rose also durchaus nicht hinreichend, um die Gültigkeit der Theorie von Th. Young zu erschüttern.

Von den Mitteln, die derselbe Beobachter zur Untersuchung der Farbenblinden angewendet hat, ist noch zu erwähnen: erstens die Beobachtung von Interferenzspectren, entworfen durch Glasplatten mit feinen parallelen Linien, durch welche der Beobachtende nach einem erleuchteten Spalt hinsah. Zu jeder Seite des Spalts sieht man bekanntlich durch eine solche Platte eine Reihe von Spectren, von denen aber nur das erste ganz isolirt ist; das Roth des zweiten deckt schon das Violett des dritten. Farbenblinde, denen das rothe Ende des Spectrum verkürzt ist, sehen auch das zweite Spectrum noch vom dritten getrennt. Hierbei wird aber natürlich viel auf die Beleuchtungsstärke des Spalts ankommen. Zu einer vorläufigen Orientirung über die Beschaffenheit eines untersuchten Auges scheint aber diese Beobachtungsweise recht brauchbar zu sein.

Sehr zweckmässig hat zweitens Herr E. Rose statt des Farbenkreisels, dessen richtige Einstellung immer viel Zeit und Geduld erfordert, die Farben benutzt, in denen Quarzplatten im polarisirten Lichte erscheinen. In seinem Instrumente, welches er Farbenmesser nennt, folgen in einer Röhre hinter einander: Ein Nicolsches Prisma A, ein rechteckiges Diaphragma B, ein doppeltbrechendes Prisma C, eine Quarzplatte D von 5 Millimeter Dicke, ein zweites Nicol'sches Prisma E, dann das Auge des Beobachters. Dieser erblickt zwei Bilder des Diaphragma B, entworfen von dem doppeltbrechenden Prisma C, beide Bilder dicht an einander stossend. Wegen der Drehung der Polarisationsebene in der Quarzplatte sind beide genau complementär gefärbt und ihre Farben können durch Drehung des Nicol'schen Prisma A geändert werden. Drehung des andern Nicol'schen Prisma E verändert die Helligkeit der Farben, ohne ihre Zusammensetzung zu ändern, und wird gebraucht um beide gleich hell zu machen. Ein normales Auge kann bei einer Quarzplatte von der genannten Dicke keine Farbengleichung zu Stande bringen, wohl aber ein rothblindes Auge. Die als gleich eingestellten Farben sind roth und blaugrün; auch hier machen übrigens verschiedene rothblinde Personen etwas verschiedene Einstellungen. Wenn man dickere Quarzplatten nimmt, oder mehrere gleichsinnig drehende Platten über einander schichtet und noch eine aus zwei Prismen zusammengesetzte Platte von veränderlicher Dicke hinzufügt, wie sie in den Apparaten von Soleil zur Bestimmung des Zuckergehalts angewendet sind, kann man auch Farbengleichungen für das normale Auge herstellen, indem man ein Weiss aus Roth, Grün, Violett, ein zweites aus Gelb und Blau erhält. Doch zeigte sich auch hier zwischen den nicht farbenblinden Augen von Herrn Dr. Hirschmann und meinen eigenen ein Unterschied, wie ihn Maxwell's Untersuchungen erwarten liessen.

In dem Santonin ist übrigens ein Mittel gefunden worden, um auch gesunde Augen vorübergehend violettblind zu machen. Damit die Wirkung schnell ein-

trete und nicht zu lange anhalte, nimmt man 10 bis 20 Gran santoninsauren Natrons. Nach 10 bis 15 Minuten fängt die Veränderung an und dauert mehrere Stunden. Uebrigens treten dabei auch Uebelkeiten, grosse Müdigkeit und Gesichtshallucinationen auf, so dass ein solcher Versuch nicht ohne Beschwerde ist. Durch grössere Dosen werden Thiere getödtet. Die der Wirkung des Santonins unterworfenen Personen sehen helle Objecte grüngelb, dunkle Flächen dagegen mit Violett überzogen; das violette Ende des Spectrum verschwindet. Ihr Farbensystem ist dichromatisch, oder wenigstens annähernd so. Bei den Versuchen mit der Quarzplatte zeigte sich, dass bei mässiger Stärke der Beleuchtung Farbengleichungen mit nur zwei Grundfarben im Santoninrausch hergestellt werden konnten, aber nicht bei grösserer Lichtstärke. Die hergestellten Farbengleichungen blieben aber nicht längere Zeit constant, sondern der Zustand veränderte sich fortdauernd ziemlich merklich. Es waren gelbe und violette Mischfarben, die für gleich erklärt wurden.

Der Querschnitt des Sehnerven, mit dem Augenspiegel betrachtet, zeigte sich nicht gelbgefärbt, so dass keine, oder wenigstens keine merkliche gelbe Färbung der Augenflüssigkeiten vorhanden war. Dagegen waren die Blutgefässe der Netzhaut stark gefüllt.

Beurtheilen wir diese Erscheinungen nach den Voraussetzungen von Young's Farbentheorie, so ist zu schliessen, dass die Empfindlichkeit der violettempfindenden Nervenfasern an sich nicht verloren war, wohl aber die Endorgane (Zapfen der Netzhaut) unempfindlich gegen die Einwirkung des violetten Lichts geworden waren. Violettes und blaues Licht afficirte also das Auge nicht mehr, trotzdem offenbar aus inneren Erregungsursachen auf allen dunkleren Objecten Violett gesehen wurde. Es erinnert dies an das Grün, mit dem sich alle dunklen Flächen bedecken, wenn man ein rothes Glas dicht vor beide Augen nimmt. Ob sich nun im Santoninrausch blos der gewöhnliche Grad der inneren Netzhautreizung oder ein stärkerer bemerklich machte, ist schwer zu entscheiden. Ja, es scheint sogar fraglich, ob wir es hier nicht blos mit einer Erregung der violettempfindenden Fasern durch das Santonin zu thun haben, welche die Empfindlichkeit des Auges gegen das objective violette Licht durch Ermüdung herabsetzt und so eine unvollkommene Violettblindheit hervorbringt.

Die Veränderung der objectiven Farben lässt sich im Ganzen als Violettblindheit betrachten; ob die Schwankungen des Urtheils, welche E. Rose, sowohl bei den Farbenscheiben, wie mit den Polarisationsfarben des Quarzes beobachtet hat, von der wechselnden Injection der Netzhautgefässe mit Blut, welches einigermassen, wie ein absorbirendes farbiges Medium wirken könnte, herrühren, ist aus den Versuchen noch nicht zu entscheiden.

Daneben könnte man hier freilich ebenso, wie bei den natürlich Farbenblinden auch daran denken, dass nicht die Leistungsfähigkeit der Nervenfasern aufgehoben würde, sondern die Gestalt der Intensitätscurven *Fig. 119* für die drei Arten lichtempfindlicher Elemente sich änderte, wobei dann eine viel grössere Veränderlichkeit in dem Verhalten der objectiven Farben gegen das Auge eintreten könnte. Dafür liesse sich anführen, dass, wie E. Rose einige Male beobachtet hat, im Santoninrausch rothes und gelbes Licht gesehen, aber für

violett gehalten wurde, als ob die Zapfen der violettempfindenden Fasern in ihrer Reaction gegen Licht denen der rothempfindenden ähnlicher geworden waren. Andererseits scheint sich nach den Beobachtungen von Hirschmann diese Erscheinung hinreichend aus der Verbreitung subjectiven violetten Lichts über das ganze Gesichtsfeld, wie sie bei der Santoninwirkung eintritt, zu erklären.

1858. de Martini. *Effets produits sur la vision par la santonine. C. R.* XLVII, 259—260.
— A. v. Baumgartner. Ein Fall ungleichzeitiger Wiederkehr für verschiedene Farben. Wiener Ber. XXIX, 257—258.
— G. Wilson. *A note on the statistics of colour blindness. Year book of facts.* 1858. p. 138—139.
1859. J. F. W. Herschel. *Remarks on colour blindness. Proc. of R. Soc.* X, 72—84. *Phil. Mag.* (4) XIX, 148—158.
— W. Pole. *On colour blindness. Phil. Trans.* CXLIX, 323—339. *Ann. de chimie.* (3) LXIII, 243—256.
— T. L. Phipson. *Action de la santonine sur la vue. C. R.* XLVIII, 593—594.
— Lefèvre. *Action de la santonine.* Ebenda. 448.
— E. Rose. Ueber die Wirkung der wesentlichen Bestandtheile der Wurmblüthen. Virchow Arch. XVI, 233—253.
1860. J. J. Oppel. Einige Beobachtungen und Versuche über partielle Farbenblindheit. Jahresber. d. Frankfurter Vereins. 1859—1860. S. 70—114.
— Gladstone. *On his own perception of colour. Athen.* 1860. II, 24. *Rep. of Brit. Assoc.* 1860. (2) p. 12—13.
— E. Rose. Ueber die Farbenblindheit durch Genuss der Santonsäure. Virchow Archiv. XIX, 522—536. XX, 245—290.
— A. de Martini. *Sur la coloration de la vue et de l'urine produite par la santonine. C. R.* L, 544—545. *Inst.* 1860. p. 108—109.
— Guépin. *Note sur l'action de la santonine sur la vue et son action thérapeutique. C. R.* LI, 794—795.
— J. C. Maxwell. *On the theory of compound colours and the relations of the colours in the spectrum. Proc. Roy. Soc.* X, 404—409; 484—486. *Phil. Trans.* CL, 57—84. *Phil. Mag.* (4) XXI, 141—146. *Cimento* XII, 33—37. *Rep. of Brit. Assoc.* 1860 (2), p. 16.
1861. J. J. Oppel. Nachträgliche Bemerkungen zu dem vorjährigen Aufsatze über Farbenblindheit. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1860—1861. S. 42—47.
— J. Z. Laurence. *Some observations on the sensibility of the eye to colour. Phil. Mag.* (4) XXII, 220—226.
— E. Rose. Ueber stehende Farbentäuschungen. Archiv für Ophthalm. VII (2), S. 72—108.
1862. J. J. Oppel. Zur Veranschaulichung der Achromatopsie für nicht damit Behaftete. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1861—1862. S. 48—55.
1863. R. Schelske. Ueber Farbenempfindungen. Archiv für Ophthalm. IX, 3, S. 39—62.
— E. Rose. Ueber die Hallucinationen im Santonrausch. Virchow Archiv. XXVIII.
1864. Aubert. Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 154—186.
1865. R. Schelske. Ueber Rothblindheit in Folge pathologischen Processes. Archiv für Ophthalm. XI (1), 171—178.
— C. Bohn. Ueber das Farbensehen und die Theorie der Mischfarben. Pogg. Ann. CXXV, 87—118. (Versuch einer Theorie, ähnlich der von Grailich.)
1866. E. Brücke. Die Physiologie der Farben für die Zwecke der Kunstgewerbe. Leipzig.

§. 21. Von der Intensität der Lichtempfindung.

1854. J. J. Oppel. Ueber den Einfluss der Beleuchtung auf die relative Lichtstärke verschiedener Farben. Jahresber. des Frankf. Vereins. 1853—54. S. 44—49.
1858. A. C. Twining. *The relation of illumination to magnifying power, when visibility is maintained.*
1861. H. Aubert. Beiträge zur Physiologie der Netzhaut. Abhd. der schlesischen Gesellsch. 1861. S. 49—103.
— Volkmann. Ueber den Einfluss der Extension eines Lichtreizes auf dessen Erkennbarkeit. Göttinger Nachrichten. 1861. S. 170—176.
— Derselbe. Ueber die Irradiation, welche auch bei vollständiger Accommodation des Auges Statt hat. Münchener Ber. 1861. (2) 75—78.

1862. Aubert. Ueber subjective Lichterscheinungen. Pogg. Ann. CXVII, 638—641.
1863. v. Wittich. Ueber die geringsten Ausdehnungen, welche man farbigen Objecten geben kann, um sie noch in ihrer specifischen Farbe wahrzunehmen. Königsberger Medic. Jahrbücher. IV, S. 23—55.
— Volkmann. Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Heft 1. Leipzig 1863.
1864. G. Th. Fechner. Ueber die Frage des psychophysischen Grundgesetzes mit Rücksicht auf Aubert's Versuche. Leipziger Ber. 1864.
— Aubert. Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 23—153.

§. 22. Dauer der Lichtempfindung.

E. Brücke hat die Aufmerksamkeit darauf gelenkt, dass bei Scheiben, wie *Fig. 137*, Seite 339, wenn sie mit einer gewissen Geschwindigkeit rotiren, die mittleren Ringe heller erscheinen, als die inneren oder äusseren, dass also bei einer gewissen Geschwindigkeit des Wechsels zwischen Weiss und Schwarz die Summe des Lichteindrucks nicht nur grösser ist, als bei langsamerem Wechsel, wobei jede Farbe ungestört von der andern für sich zur Erscheinung kommt, sondern auch grösser als bei schnellerem Wechsel, wobei Weiss und Schwarz sich zu gleichmässigem Grau vereinigen. Er fand, dass der Eindruck am stärksten war, wenn auf die Secunde $17\frac{1}{2}$ Lichteindrücke kamen, und dass er etwa doppelt so viel brauchte, um ganz gleichmässiges Grau zu sehen.

Blickte er nach einer Scheibe, in welcher statt der weissen Sectoren Oeffnungen waren, mit einer rothen Glasscheibe verdeckt, so wurde bei derjenigen Geschwindigkeit, welche die stärkste Lichtwirkung gab, das Roth gleichzeitig weisslicher, was Brücke von der Einmischung des auf S. 377 erwähnten positiven complementären Nachbildes des Roth ableiten zu können glaubt. Spectrales Grün wird unter denselben Umständen gelber, spectrales Blau nicht verändert.

Es handelt sich hierbei offenbar um eine complicirte Wechselwirkung zwischen Erregung und Ermüdung der Netzhaut. So oft der Eindruck des Weiss beginnt, steigert sich anfangs die Erregung eine gewisse kurze Zeit bis zu einem Maximum, um nachher durch die allmälig zunehmende Ermüdung wieder abzunehmen. Ich bemerke dabei, dass ich mir Nachbilder von solchen flimmernden rotirenden weissschwarzen Scheiben, sowohl ohne Einschaltung eines rothen Glases, als mit einer solchen entwickelt habe, und dass der endliche nachdauernde Zustand der Ermüdung für alle Theile der Scheibe genau derselbe und in dem Nachbild keine Spur eines Unterschieds zwischen den flimmernden und nicht flimmernden Ringen zu sehen ist, obgleich andrerseits das Nachbild scharf genug war, dass ich den Rand der Scheibe und den kleinen Knopf, der das Ende der Axe bildete, sehr wohl darin erkennen konnte.

Nehmen wir nun an, dass nach dem Vorübergang jedes schwarzen Sectors dieser mittlere Zustand der Ermüdung wiederhergestellt sei, wie er schliesslich im Nachbilde andauert, so werden die ersten Momente des eintretenden Weiss den stärksten Eindruck machen; wird der Eindruck dann abgebrochen, wenn er sein Maximum erreicht hat, so machen eben alle Sectoren der betreffenden Reihe diesen Maximaleindruck, während bei einer geringeren Zahl länger dauernder Eindrücke die Zahl dieser Maxima eine geringere ist und die Dauer des allmälig sich abschwächenden Eindrucks die Verminderung ihrer Anzahl

nicht ersetzen kann. Ich möchte den Eindruck der flimmernden Ringe einer solchen Scheibe auf mein Auge auch nicht so beschreiben, dass ich sagte, der ganze flimmernde Ring zeige eine grössere Helligkeit — denn der ganze Ring hat ja fortdauernd seine dunklen Stellen —; vielmehr erscheint das Weiss, soweit es sichtbar ist, auf den flimmernden Ringen verhältnissmässig am hellsten und reinsten, und es macht deshalb einen verhältnissmässig starken Eindruck auf das Auge. Der Eindruck eines hellen Lichts wird ja dadurch nicht aufgehoben, dass unmittelbar darauf Dunkel folgt.

Blickt man nun durch ein rothes Glas nach der rotirenden Scheibe, so erscheint auf den schwarzen Sectoren das complementäre Blaugrün des Eigenlichtes der Netzhaut (siehe Seite 368) sehr deutlich, dasselbe was auch in dem schliesslichen Nachbilde zurückbleibt. Auf den flimmernden Sectoren, wo das Roth im Maximum seiner Helligkeit und Reinheit erscheint, ist es allerdings auffallend, wie sich im Gegensatz dazu auch das complementäre Blaugrün stärker der Aufmerksamkeit aufdrängt, so dass diese Ringe namentlich im indirecten Sehen geradezu bläulich auf dem rothen Grunde der Scheibe erscheinen. Ich muss aber von Brücke's Beschreibung darin abweichen, dass mir zwischen diesem flimmernden Blaugrün das Roth des Ringes gerade gesättigter und glänzender erscheint, als auf den anderen Ringen, wenn ich meine Aufmerksamkeit darauf richte. Es ist dies ein solcher Fall, wo man zwei Farben entgegengesetzter Art scheinbar an demselben Orte übereinander sieht, und es scheint mir, dass die abweichendste, wenn auch lichtschwächere, das Blaugrün, sich der Aufmerksamkeit am meisten aufdrängt. Indessen gebe ich zu, dass diese ganze Lehre von dem farbigen Abklingen farbigen Lichtes noch eine zu grosse Menge unerklärter complicirter Erscheinungen enthält, als dass man jetzt schon die Erklärungen der Einzelheiten vollkommen feststellen könnte.

A. Fick hat die auf Seite 340 erwähnten Versuche von Plateau wiederholt, und glaubt kleine Abweichungen von dem dort aufgestellten Gesetze gefunden zu haben, dass der Eindruck einer rotirenden Scheibe so ist, als wäre das Licht jedes Ringes gleichmässig über den ganzen Ring ausgebreitet.

1858. D. Brewster. *On the duration of luminous impressions of certain points of the retina. Athen.* 1858. II, 521.
1860. W. Dove. Ueber einen besonderen Farbenkreisel des Herrn Lohmeier in Hamburg. Berl. Monatsber. 1860. S. 491. (Ist gleich dem Seite 350 beschriebenen Dädaleum.)
— Goodchild. Trocheidoskop. Dingler J. CLVII, 181—184. Pract. mechan. J. 1860. April 4. (Farbenscheiben für Contrasterscheinungen benutzt.)
1862. F. Zöllner. Ueber eine neue Art anorthoskopischer Zerrbilder. Pogg. Ann. CXVII, 477—484.
— J. J. Oppel. Vorläufige Notiz über eine eigenthümliche Augentäuschung in Bezug auf Rotationsrichtungen. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1861—1862. S. 56—57.
— D. Brewster. *On the compensation of impressions moving over the retina. Rep. of Brit. Assoc.* 1861 (2), p. 29.
1863. A. Fick. Ueber den seitlichen Verlauf der Erregung in der Netzhaut. Reichert und du Bois Archiv. 1863. S. 739—764
1864. E. Brücke. Ueber den Nutzeffect intermittirender Netzhautreizungen. Wiener Ber. XLIX, 21. Jan. 1864
— Aubert. Physiologie der Netzhaut. Breslau. S 96—103.

§. 23. Die Veränderungen der Reizbarkeit.

1857. MELSENS. *Recherches sur la persistance des impressions de la rétine. Bull. de Bruxelles* (2) III, 214—252. *Cl. d. sc.* 1857. p. 735—777.
1858. H. AUBERT. Ueber das Verhalten der Nachbilder auf den peripherischen Theilen der Netzhaut. MOLESCHOTT's Untersuchungen zur Naturlehre. IV, 215—239.
— J. M. SÉGUIN. *Note sur les couleurs accidentelles. C. R.* XLVII, 198—200.
1859. H. AUBERT. Ueber die durch den elektrischen Funken erzeugten Nachbilder. MOLESCHOTT Untersuchungen. V, 279—314.
1861. J. SMITH. *On the chromascope. Rep. of Brit. Assoc.* 1860 (2), p. 65—66. Ebenda. 1861 (2). 33.
1862. AUBERT. Untersuchungen über die Sinnesthätigkeiten der Netzhaut. Pogg. Ann. CXV, 87—116. CXVI, 249—278.
— ROSE. *Presentations of colour produced under novel conditions. Rep. of Brit. Assoc.* 1861 (2), p. 33. (Aus intermittirendem Weiss und Schwarz).
1864. AUBERT. Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 347—386.
1865. E. BRÜCKE. Ueber Ergänzungsfarben und Contrastfarben. Wiener Sitzungsber. LI.

§. 24. Vom Contraste.

BURCKHARDT hat eine Reihe von Versuchen über die Contrastfarben in Nachbildern angestellt, welche im Allgemeinen ausserordentlich lebhaft sind, weil die Bedingungen für die Erzeugung des Contrastes hier besonders günstig sind. Dergleichen Fälle sind oben auf Seite 371 und 400 erwähnt. Das Nachbild von Weiss, welches von einfarbigem Grunde umgeben ist, erscheint diesem Grunde gleichfarbig. Stossen an das weisse Feld zwei verschiedene Farben in gleicher Ausdehnung an, so erscheint das Nachbild des Weiss in der Mischfarbe der beiden Farben des Grundes. Entwirft man das Nachbild auf farbigen Grund, so mischt sich der Farbe dieses Grundes noch die hinzu, welche das Nachbild auf weissem Grunde zeigen würde. Sehr hübsch ist folgender Versuch. Eine Farbenscheibe mit zwei farbigen Sectoren fixirt man, während sie still steht. Dann fängt man plötzlich an zu drehen, während man fortfährt zu fixiren. Man sieht das Nachbild dann auf der Scheibe in umgekehrter Färbung der Sectoren.

1858. CHEVREUL. *Note sur quelques expériences de contraste simultanée des couleurs. C. R.* XLVII, 196—198. Dingler J. CXLIX, 435—436.
1859. NARDO. *Nota sulle ombre colorate ottenute col solo concorso di luce bianche. Cimento* IX, 352—356. *Atti dell' Istit. Veneto.* V. Zeitschr. für Chemie. 1860. p. 18—20.
— RAGONA. *Su taluni fenomeni di colorazione soggettiva. Atti dell' Acad. Palermit.* III. Zeitschr. für Chemie. 1859. p. 20—24.
1860. G. TH. FECHNER. Ueber die Contrastempfindung. Leipzig. Ber. 1860. S. 71—145.
— OSANN. Ueber Ergänzungsfarben. Würzb. Zeitschr. I, 61—77.
— FECHNER. Einige Bemerkungen gegen die Abhandlung Prof. OSANN's über Ergänzungsfarben. Leipz. Ber. 1860. 146—165.
— J. J. OPPEL. Ueber farbige Schatten bewirkt durch weisses Licht. Jahresber. des Frankf. Vereins. 1859—1860. S. 65—69.
1861. ROSSOLINI. *Sulle ombre colorate. Atti dell' Istit. Lombardo.* II, 318—321.
1862. H. AUBERT. Beiträge zur Physiologie der Netzhaut. Abhandl. der schlesischen Gesellsch. 1861 (1), S. 49—103. S. 344.
— G. TH. FECHNER. Ueber den seitlichen Fenster- und Kerzenversuch. Leipz. Ber. 1862. S. 27—56.
1865. FR. BURCKHARDT. Die Contrastfarben im Nachbilde. Basler Verhandl. 1865.

§. 25. Verschiedene subjective Erscheinungen.

1859. H. MÜLLER. Ueber die elliptischen Lichtstreifen von PURKINJE. Verhandl. der Würzburger Ges. IX, 30.

1860. J. CZERMAK. Ueber die entoptische Wahrnehmung der Stäbchen- und Zapfenschicht. Wiener Ber. XLI, 644—648.

1861. Derselbe. Zur objectiven Erklärung einiger sogenannten subjectiven Gesichtserscheinungen. Wiener Ber. XLIII (2), S. 163—174.

— PURKINJE. Bemerkungen über eine subjective Lichterscheinung. Prager Ber. 1861. S. 84.

— L. REUBEN. *On normal quasi-vision of the moving blood-corpuscles within the retina of the human eye. Silliman J.* (2) XXXI, 325—338; 417.

— D. BREWSTER. *On certain affections of the retina. Phil. Mag.* (4) XXI, 20—24. *Silliman J.* (2) XXXI, 417.

— Derselbe. *On the optical study of thd retina. Athenaeum.* 1861. p. 412. *Rep. of Brit. Assoc.* 1861. (2) p. 29

§. 27. Die Augenbewegungen.

Für die Theorie der Augenbewegungen möchte ich hier nachträglich noch einen vielleicht nicht ganz unwichtigen Umstand erwähnen. Die Befestigung des Auges an der Conjunctiva und selbst in dem Bindegewebe und Fettpolster der Augenhöhle ist eine solche, dass eine Verschiebung nach dem LISTING'schen Gesetz verhältnissmässig die geringste Spannung dieser Theile hervorbringen wird. Jede stärkere Raddrehung des Auges, die vom LISTING'schen Gesetze abwiche, würde nothwendig eine Zerrung und theilweise Faltung einzelner Streifen der Conjunctiva hervorbringen müssen. So würde auch von dieser Seite her die Bewegung nach dem LISTING'schen Gesetze als die mit der geringsten Anstrengung und Unbequemlichkeit verbundene erscheinen, wie dies FICK und WUNDT für die Muskeln geschlossen haben.

Zusatz zu Seite 516. Die stereographische Projection der Punkte einer Kugel in eine Ebene giebt noch ein bequemes Mittel ab, durch einfache Linienconstruction die Grösse der Raddrehungen des Auges sowohl anschaulich, als auch messbar zu machen, im Fall man weitläuftige Rechnungen vermeiden will.

Es seien also die Punkte des Blickfeldes stereographisch in eine Ebene eingetragen. Hat man, wie FICK, MEISSNER, WUNDT, die als *Longitudo* und *Latitudo* bezeichneten Winkel für die Messung gebraucht, so kann man für die Eintragung in das Gesichtsfeld ein Linienschema gebrauchen, wie das der Meridiane und Parallelkreise auf einer Karte der östlichen oder westlichen Erdhemisphäre. Die Meridiane messen FICK's *Longitudo* (l der Gleichungen 4e) und 4f) Seite 497), die Parallelkreise seine *Latitudo* (m derselben Gleichungen). Die Meridiane einer solchen Hemisphärenkarte sind bekanntlich Kreisbögen, welche durch beide Pole gehen und den geradlinigen Aequator schneiden in einer Entfernung vom Mittelpunkte, welche gleich $R \tan\left(\frac{1}{2} l\right)$ ist, wenn R den Radius des Umfangs der Karte bezeichnet. Die Parallelkreise schneiden die Peripherie an Punkten, deren Bogenentfernung von den Enden des Aequators gleich m ist, und den verticalen Durchmesser des Kreises in einer Entfernung, welche gleich $R \tan\left(\frac{1}{2} m\right)$ ist. Nach diesen Angaben können alle diese Kreise construirt werden.

Benutzt man die Erhebungswinkel λ und die Seitenwendungswinkel μ, so muss man die beiden Pole nach rechts und links legen, den Aequator vertical. Auch dann messen die Meridiane den Winkel λ, die Parallelkreise den Winkel μ.

Hat man, wie VOLKMANN die Lage der Punkte nach Meridianen des Blickfeldes und nach ihrem Winkelabstand vom Pole des Blickfeldes bestimmt, so muss man Liniennetze gebrauchen, ähnlich denen der polaren Hemisphärenkarten. Die Meridiane des Blickfeldes sind dann gerade Linien, die durch den Mittelpunkt des Kreises gehen und dieselben Winkel mit einander machen, wie jene Meridiane. Der Bogen α, vom Pol aus gemessen, ist auf ihnen durch die Länge $R \operatorname{tang}\left(\frac{1}{2}\alpha\right)$ darzustellen.

In *Fig. 213* stelle der Kreis $afbg$ den Umfang des halbkugelförmigen Blickfeldes in stereographischer Projection dar; c sei sein Mittelpunkt und der Anfangspunkt

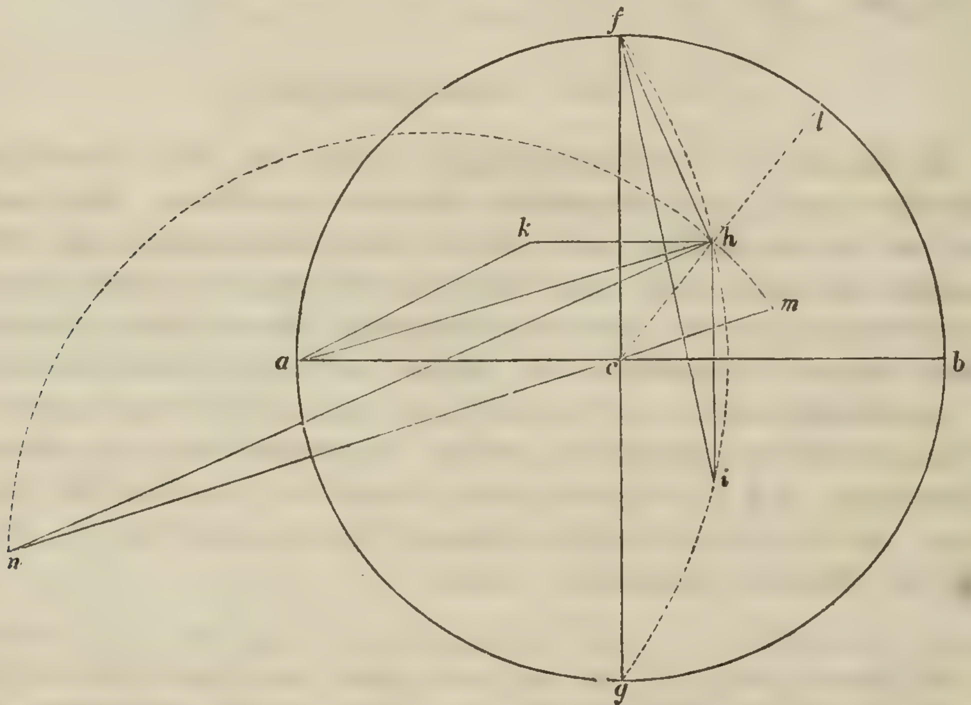


Fig. 213.

für die Winkelmessungen, h der Punkt, für den die Raddrehung des Auges zu bestimmen sei. Wir unterscheiden zwei Fälle:

1. Der Mittelpunkt c entspricht der Primärlage des Auges.

Construction. Fälle ein Loth hi von h auf die Horizontallinie ab und verlängere es bis zum Punkte i, der ebenso weit von ab entfernt ist, wie h. Ziehe hf und if. Der Winkel hfi ist dann gleich dem Winkel, um den der verticale Meridian des Auges gegen die Verticallinie gedreht ist. Dies ist der Winkel k' der Gleichungen 4e) und 4f) Seite 497.

Beweis. Wenn c die Primärlage des Auges ist, und der Blick von c nach h längs der geraden Linie ch (die einen Meridian des Blickfeldes darstellt) bewegt wird, so verschiebt sich ch nach dem LISTING'schen Gesetze in sich selbst. Da nun gleiche Flächenwinkel in den stereograpischen Projectionen immer durch gleiche ebene Winkel dargestellt sind, so muss ein verticales Linienelement des Sehfeldes, welches den Blickpunkt c schneidet, beim Blicke nach h denselben Winkel mit der

Linie cl machen, wie vorher, das heisst wieder vertical gerichtet sein. Dagegen eine durch das Auge und h gehende absolut verticale Ebene schneidet das Blickfeld in dem durch den Bogen $fhig$ dargestellten grössten Kreise. Der Winkel zwischen dem verticalen Netzhautmeridian und der durch die Blicklinie gelegten Verticalebene ist gleich dem Winkel zwischen der Tangente des Kreises $fhig$ in h und der verticalen Linie hi, welche Sehne des Kreises ist, und dieser Winkel ist wiederum gleich dem Peripheriewinkel über der Sehne hi; ein solcher ist hfi. Denn lässt man die Spitze des Peripheriewinkels über der Sehne hi dem Punkte h unendlich nahe rücken, so wird daraus jener Winkel zwischen der Sehne und der Tangente in h.

Den Winkel hfi kann man construiren, ohne den Kreis $fhig$ zu construiren; deshalb habe ich ihn in der oben vorgeschriebenen Construction benutzt. Um den Sinn der Drehung zu bezeichnen, bemerke man: es liegt der verticale Meridian der Netzhaut gegen die absolute Verticale so gedreht, wie die Linie fi gegen fh liegt (in dem Falle der *Fig. 213* also rechts herumgedreht).

Construction für die Lage des Netzhauthorizontes. Man fälle von h ein Loth auf den verticalen Durchmesser fg, verlängere es bis zum Punkte k, der ebenso weit von fg entfernt ist, wie h; ziehe ha und ka, so ist kah der Winkel, den der Netzhauthorizont mit der Visirebene macht, bei der Richtung des Blicks nach h. Und zwar liegt der Netzhauthorizont gegen die Visirebene so gedreht, wie ak gegen ah, das heisst in dem Falle der *Fig. 213*, links herum.

Beweis, wie vorher.

2. Wenn der Mittelpunkt c nicht der Primärstellung der Blicklinie entspricht.

In diesem Falle kommt zu den Winkeln hfi und hak noch eine Correction hinzu, die in folgender Weise durch Construction gefunden werden kann.

Construction. Die Richtung der Primärstellung der Gesichtslinie entspreche dem Punkte m der Projection. Man ziehe mc und verlängere es bis n soweit, dass

$$nc.\ mc = ac.\ ac.$$

Dann ist n die Projection des dem Punkte m im kugeligen Blickfelde diametral gegenüberliegenden Punktes. Man ziehe hn, so ist die Drehung des verticalen Netzhautmeridians gegen die Verticale gleich

$$< hfi - 2 < hnm$$

und die Drehung des Netzhauthorizonts gegen die Visirebene gleich

$$- < kah - 2 < hnm.$$

Die Winkel subtrahiren sich, wenn ihr zweiter Schenkel gegen den nach h gerichteten Schenkel gleichsinnig gedreht ist; sie addiren sich, wenn die zweiten Schenkel ungleichsinnig gedreht sind.

Beweis. Da m und n diametral gegenüberliegende Punkte sind, so stellen die durch m und n gelegten Kreise, so wie auch die gerade Linie mn, Meridiane des Blickfeldes vor, welche durch die Primärstellung der Blicklinie gehen und sich also in sich selbst verschieben, wenn sie vom Blicke durchlaufen werden. Es sei zuerst der Blick nach c gerichtet und nehme das Nachbild einer verticalen Linie auf; dieses ist selbst vertical und fällt in die Linie fg. Jetzt wandere der Blick nach m. Das Nachbild, wo es m schneidet, muss wieder vertical liegen. Jetzt

führe man den Blick von *m* nach *h*, längs des grössten Kreises, der durch den Bogen *mhn* dargestellt ist; das Nachbild muss in *h* mit der Tangente des Kreises denselben Winkel machen, wie die Verticale mit der Tangente in *m*. Das Nachbild wird also abgelenkt von seiner verticalen Richtung um den Winkel, den die Tangenten in *m* und *h* mit einander machen, oder um den doppelten Betrag des auf dem Bogen *hm* stehenden Peripheriewinkels *hnm*. Um so viel kleiner wird also auch der Winkel zwischen dem Nachbilde und dem verticalen grössten Kreise *fhig*, verglichen mit dem früheren Falle, wo die Primärlage in *c* war.

Die gleiche Betrachtung gilt für horizontale Nachbilder, die im Netzhauthorizonte liegen.

§. 32. Wettstreit der Sehfelder.

Durch einen Irrthum ist die Beschreibung von AUBERT's auf S. 790 erwähntem Episkotister ausgefallen. Derselbe besteht aus zwei aneinander gelegten, geschwärzten Messingscheiben, in deren jeder vier Sectoren von je 45° ausgeschnitten sind, und die sich gegen einander so verschieben lassen, dass vier Spalten übrig bleiben, deren Breite von 0° bis 45° beliebig verändert werden kann. Werden dieselben in schnelle Rotation versetzt, so erhalten sie das Ansehen und die Wirkung eines grauen Glases von einem leicht und genau zu berechnenden Grade der Lichtschwächung. Das Instrument ist von AUBERT beschrieben in seiner Physiologie der Netzhaut S. 30. 34. 283; ein ähnliches hatte auch schon TALBOT construirt, s. Poggendorff's Annalen. 1835. XXXV, 459.

Sach-Register.

(Die Ziffern bedeuten die Seitenzahlen.)

A.

B.

C.

D.

E.

F.

G.

H.

I.

K.

L.

M.

N.

O.

P.

Q.

R.

S.

T.

U.

V.

W.

Z.

Namen-Register.

(Die Ziffern bedeuten die Seitenzahlen.)

Es sind nur die Namen aus dem Text, nicht die aus den literarischen Uebersichten aufgenommen.

A.

B.

C.

D.

E.

F.

G.

H.

J.

K.

L.

M.

N.

O.

P.

Q.

R.

S.

T.

U.

V.

W.

Y.

Z.

Druck von F. A. Brockhaus in Leipzig.

Berichtigungen.

Seite 14, Z. 13 v. u., lies: „eben“ statt: „schwach“
„ 17, Z. 32 v. o., „ „δ von b“ „ „δ von γ“
„ 23, Z. 18 v. u., „ „0,002“ „ „0,02“
„ 24, Z. 5 u. 4 v. u., vertausche VII und VIII
„ 32, Z. 14 v. o., „ „Fortpflanzungsgeschwindigkeit“ „ „Fortpflanzungsrichtung“
„ 48, Z. 2 v. u., „ „tP_2 mit $-H_2$“ „ „qP_2 mit $-H_2$“
„ 51, Z. 25 v. o., „ „Ebene“ „ „Linie“
„ 52, die Gleichung vor der 8) muss heissen:

$$„H_1 = \frac{M_1 L_1}{M_1 + L_2}“$$

„ 55, die Gleichung nach der Gleichung 9) muss heissen:

$$„n_1 \gamma_1 = n_{m+1} \gamma_{m+1}“ \quad \text{statt:} \quad n_m \gamma_m$$

die dann folgende Gleichung:

$$„\gamma_{m+1} = \frac{n_1}{n_{m+1}} \gamma_1 \quad „ \quad \frac{n_{m+1}}{n_1} \gamma_1$$

„ 57, in der Gleichung 11 c) und den vorhergehenden ist zu setzen:

f_{II} statt f_2 und β_1 statt β'

„ 71, Gleichung 1) lies: „d“ statt: „a“
Ebenda Gleichung 1 b) „ „a“ „ „A“
Seite 77, Gleichung 2 a) „ „F“ „ „F_1“
„ 85, Z. 5 v. o., streiche: „der Linse“
„ 114, Z. 15 v. u., lies: „0,078 Mm.“ „ „0,088 Mm.“
„ 145, Z. 6 v. o., „ „1 Min.“ „ „2 Min.“
„ 180, Z. 8 v. u., „ „Convexspiegel“ „ „Concavspiegel“
„ 181, Z. 18 v. u., „ „Concavspiegel“ „ „Convexspiegel“
„ 197, Z. 6 v. u., „ „Netzhaut“ „ „Aderhaut“
„ 245, Z. 7 v. o., „ „$\alpha_0 + \frac{\pi}{2}$ oder $\alpha_0 - \frac{\pi}{2}$“ „ „$\alpha + \frac{\pi}{2}$ oder $\alpha - \frac{\pi}{2}$“
„ 251, Z. 5 v. u., „ „$\frac{\Delta z}{\Delta y}$“ „ „$\frac{\Delta z}{\Delta v}$“
„ 441, Z. 19 v. u., „ „nativistisch“ „ „naturalistisch“
„ 488, Z. 7 v. u., „ „sin ω“ „ „sin v“
„ 496, Gleichung 4 c) „ „tang k'“ „ „tang k_1“ und streiche das Wurzelzeichen im Nenner
„ 548, Z. 17 v. u., „ „Seite 493“ „ „Seite 60“
„ 832, Z. 7 v. u., „ „Circularfasern“ „ „Radialfasern“

ATLAS

VON

ELF TAFELN

ZU

H. HELMHOLTZ

HANDBUCH DER PHYSIOLOGISCHEN OPTIK

ALLGEMEINE ENCYKLOPÄDIE DER PHYSIK

IX. BAND.

LEIPZIG,
LEOPOLD VOSS.
1867.

Fig. 3.

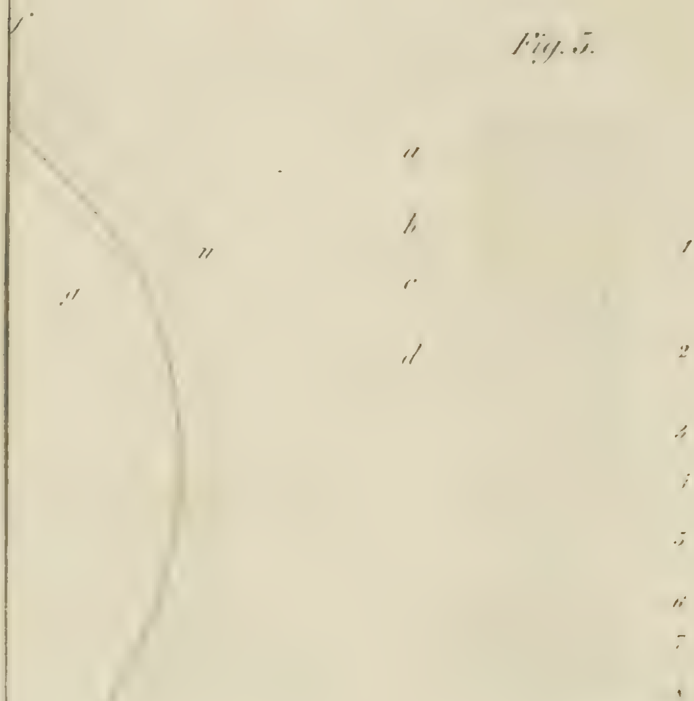


Fig. 4.

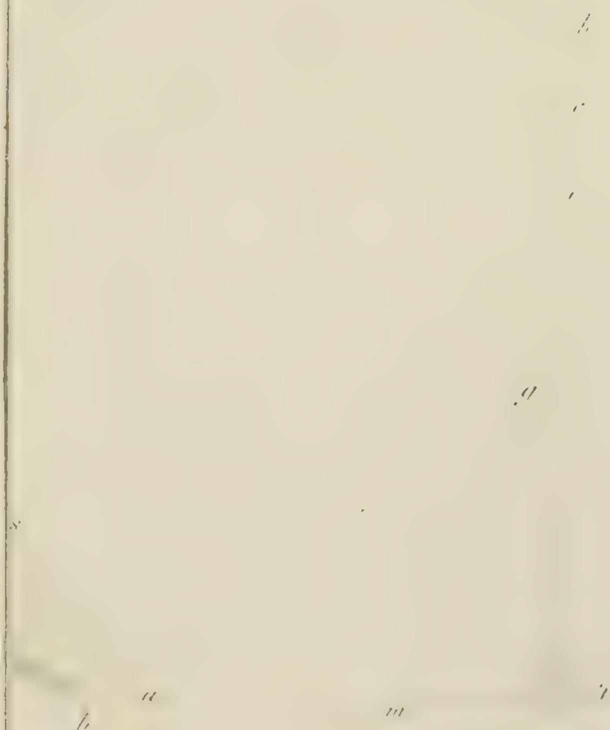


Fig. 1



Fig. 2



Fig. 5





Fig. 3



Fig. 1. ½

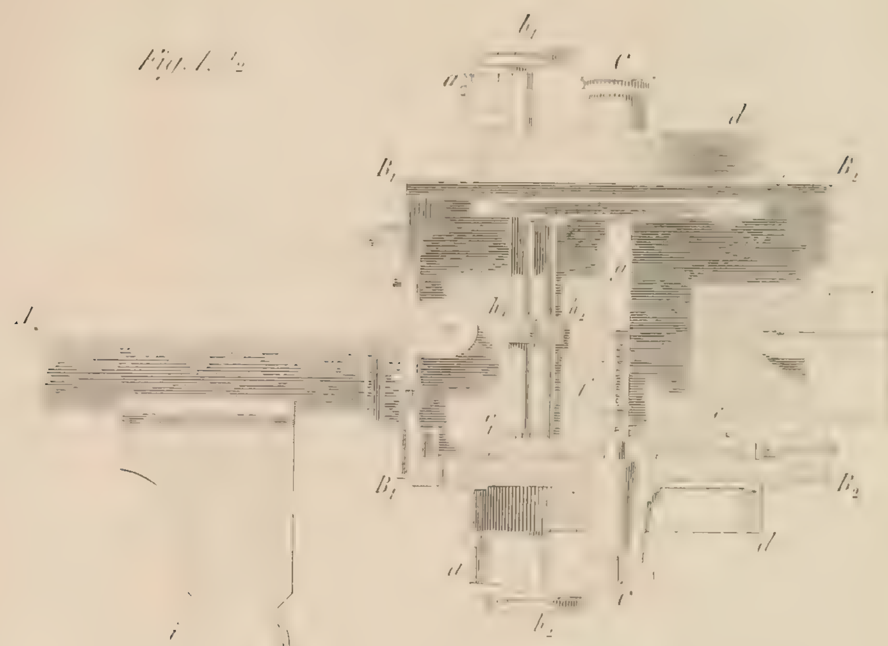


Fig. 2. ½

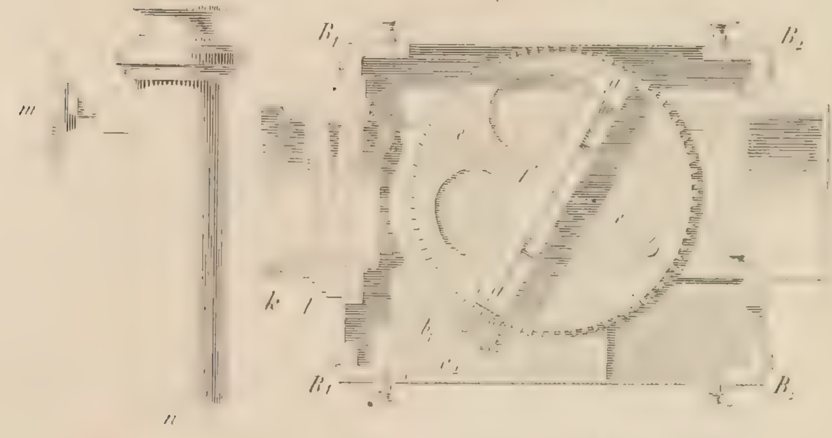


Fig. 4.

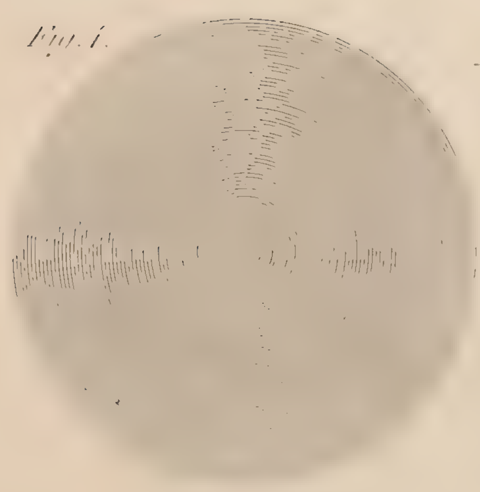


Fig. 5.

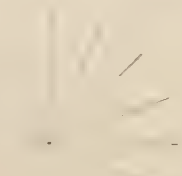
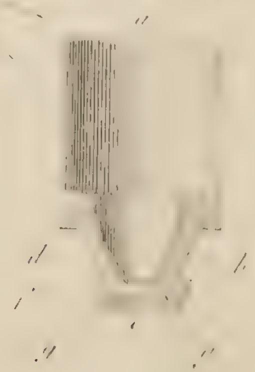


Fig. 3. ½



C. F. Weber sc.


Fig. 1. ½

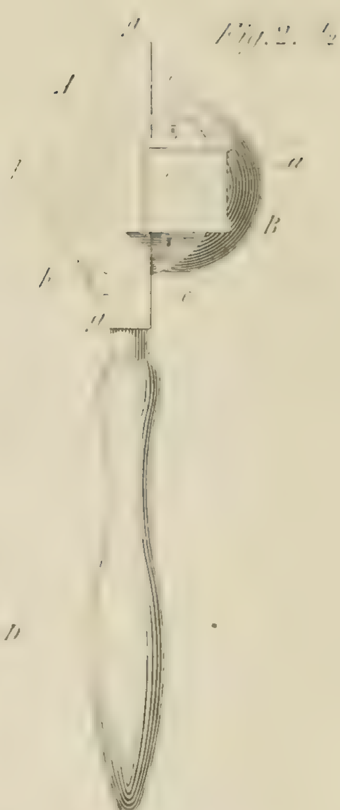

Fig. 2. ½

Fig. 5.



Fig. 3. ½

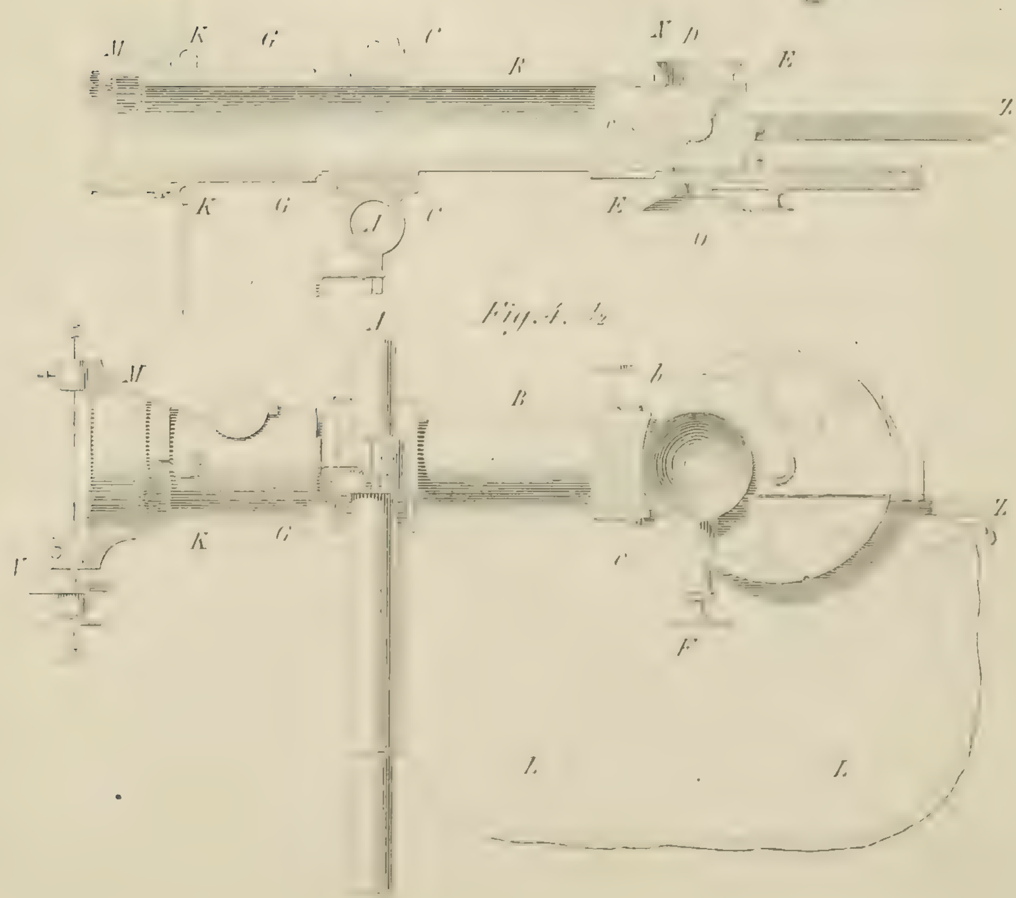

Fig. 4. ½

Fig. 1.



Fig. 2.

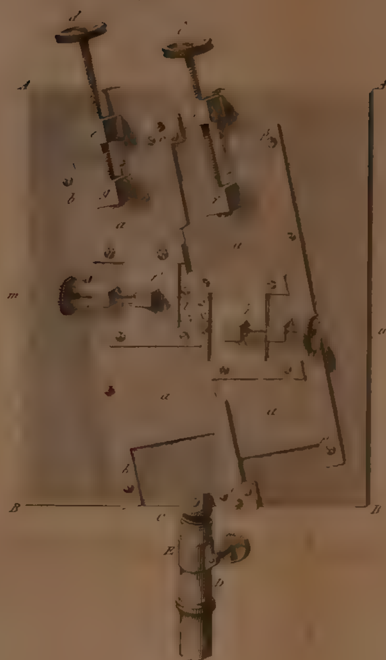


Fig. 2a



Fig. 3.



Fig. 1.

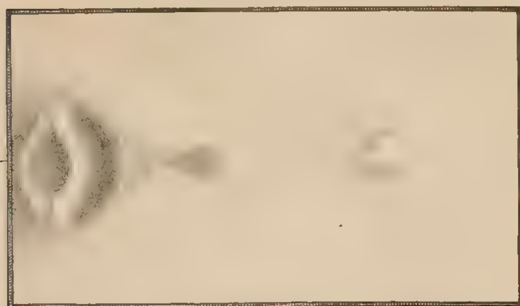


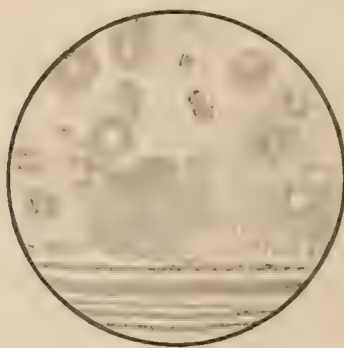
Fig. 2.



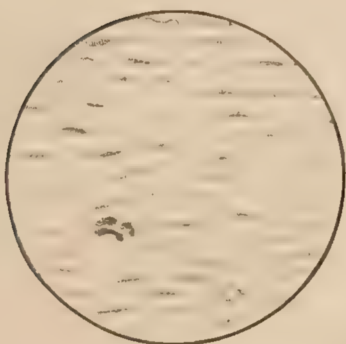
Fig. 3.



S. 151 Fig. 72.



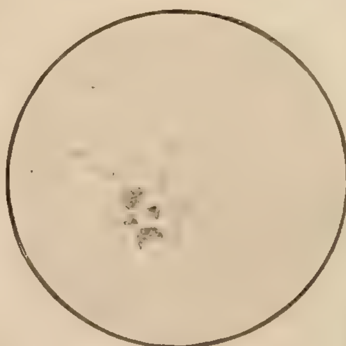
S. 151 Fig. 73.



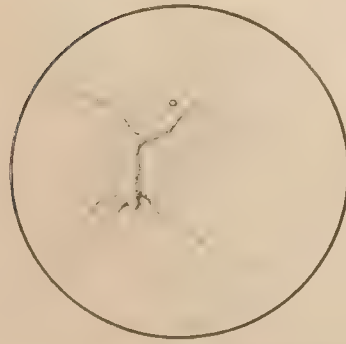
S. 152 Fig. 74.



S. 152 Fig. 75.



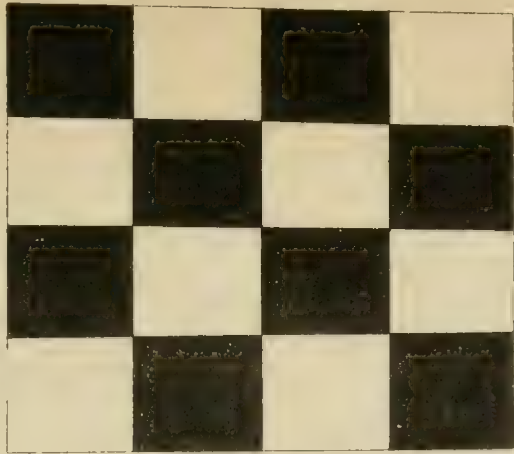
S. 152 Fig. 76.

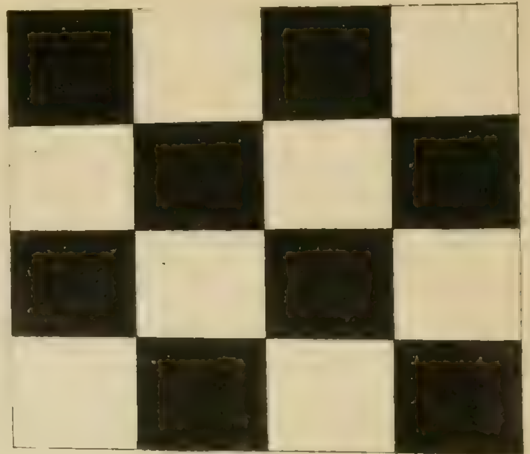


S. 152 Fig. 77.

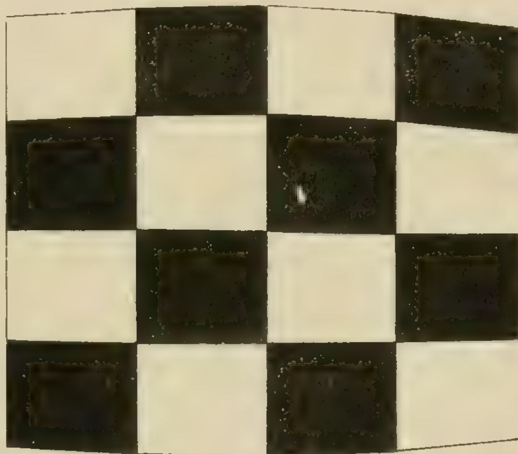


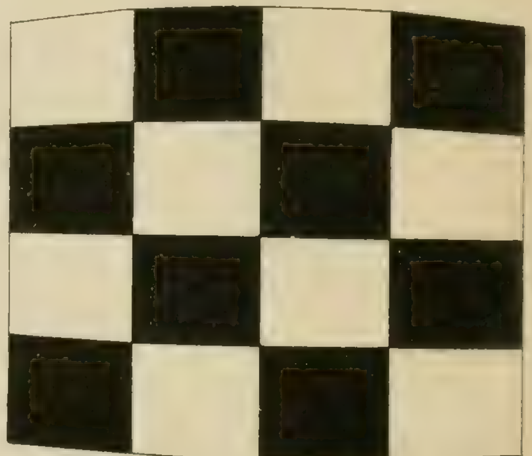
A



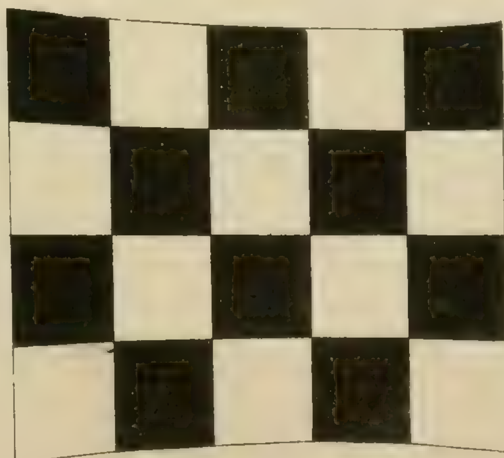


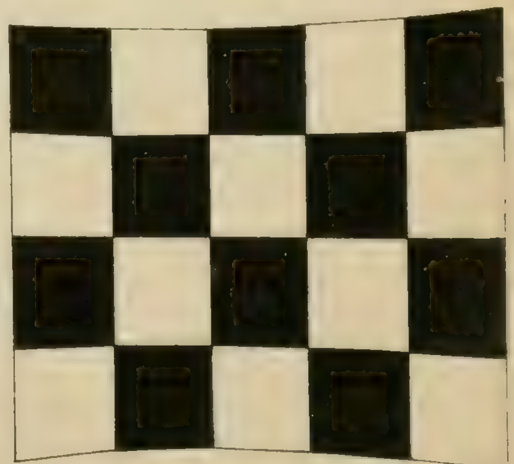
B





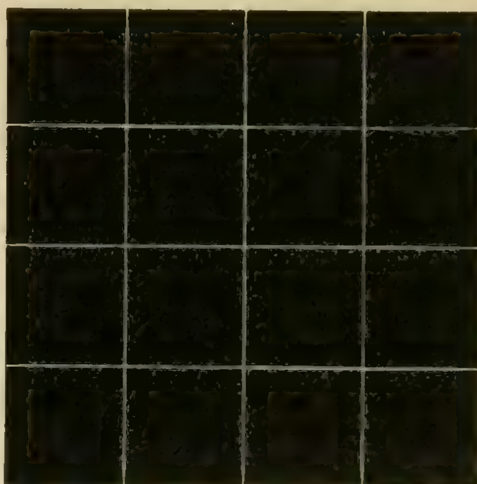
C





Lith u Druck J M Strassberger Leipzig

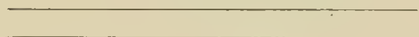
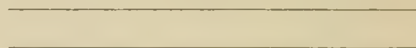
D

E



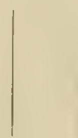

F

G




H

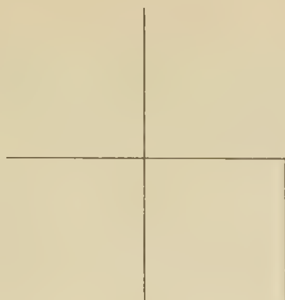



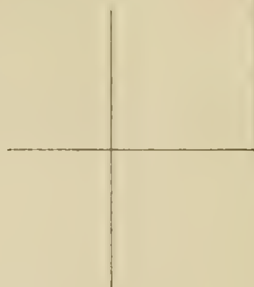
J



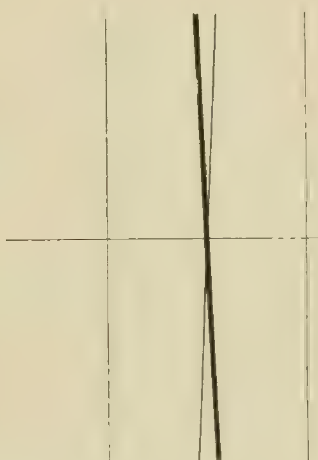

Lith. u. Druck F. M. Strassberger, Leipzig

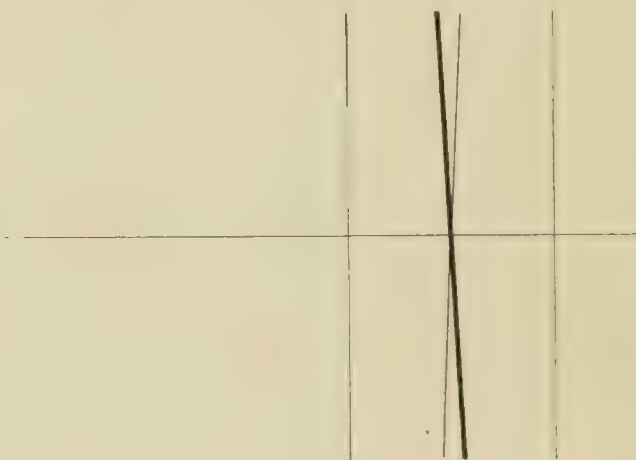
L



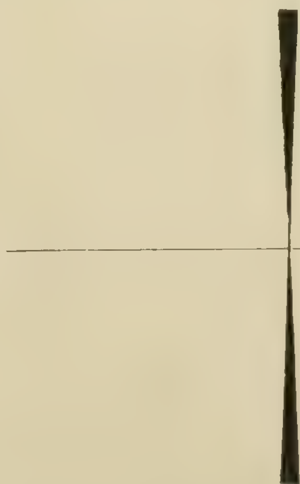


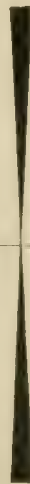
M





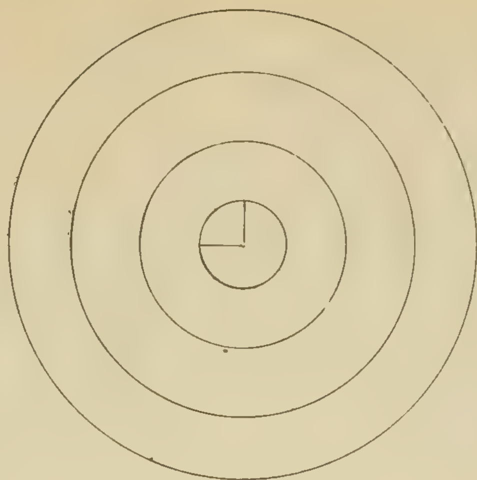
N





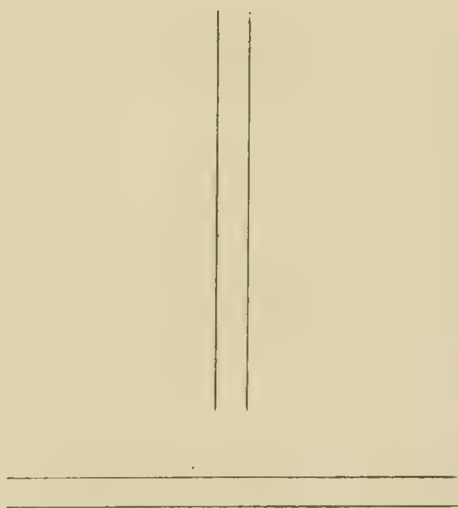
Lith. Druck v. M. Strassberger, Leipzig

O



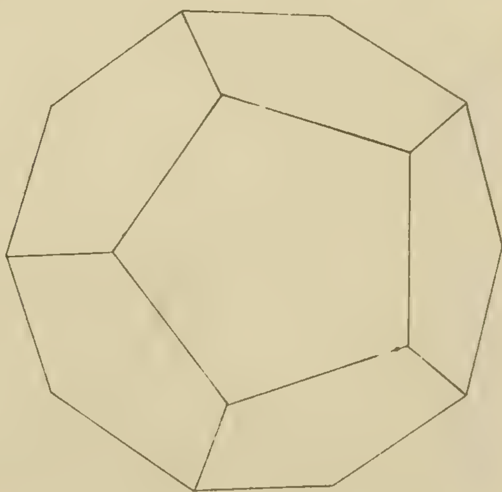


P





Q





R





S





T





U





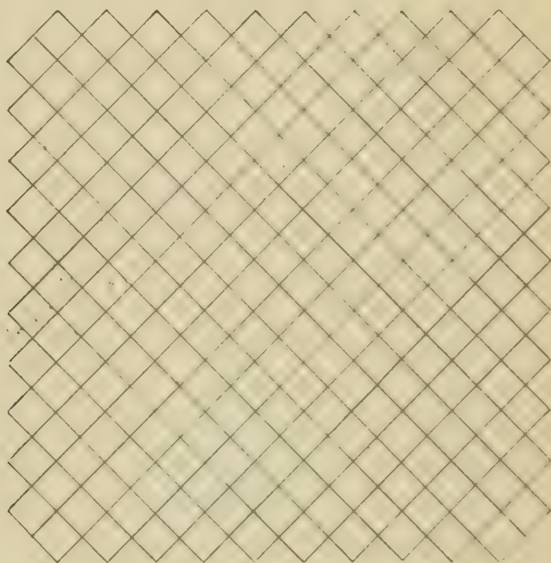
V



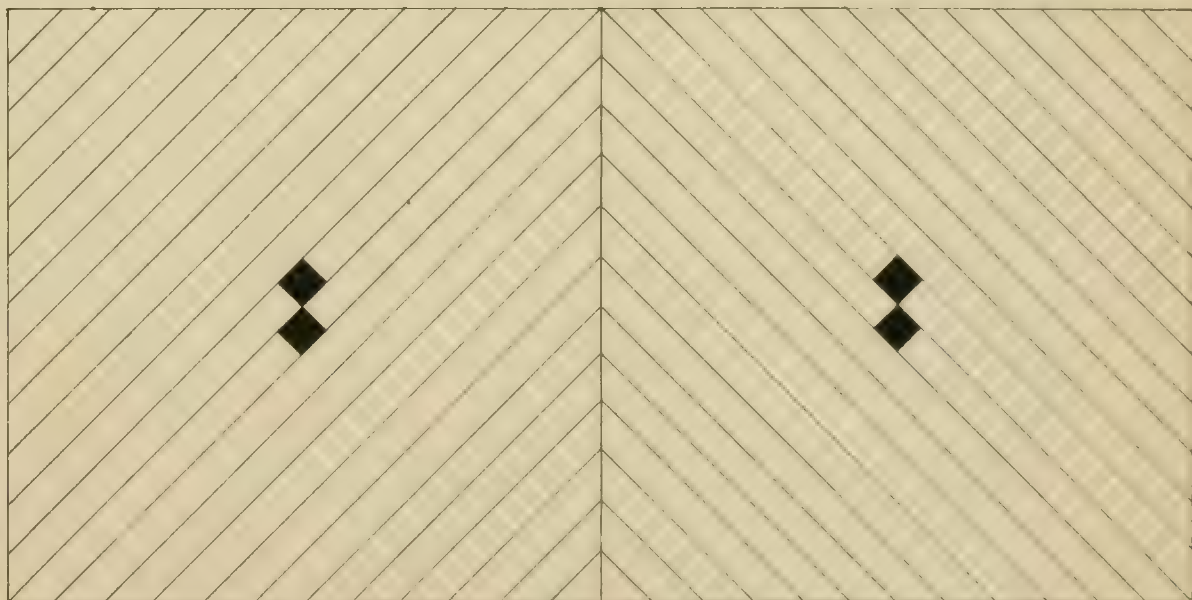


W





X



Lith u Druck F. M. Strassberger, Leipzig

